



TESIS - SF142502

**ANALISIS INVERSI *WAVEFORM* TIGA
KOMPONEN UNTUK MENENTUKAN MOMEN
TENSOR, POLA BIDANG SESAR, DAN
MEKANISME FOKUS GEMPA SULAWESI
UTARA TAHUN 2014**

**ISKANDAR ZULKARNAEN
NRP. 1113 201 003**

**DOSEN PEMBIMBING
Prof. Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, SU**

**PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN FISIKA BUMI
JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015**



TESIS - SF142502

**ANALYSIS WAVEFORM THREE
COMPONENTS INVERSION TO DETERMINE
MOMENT TENSOR, PATTERN OF FAULT
PLANE, AND MECHANISM FOCUS OF
NORTH SULAWESI EARTHQUAKE 2014**

**ISKANDAR ZULKARNAEN
NRP. 1113 201 003**

**ADVISOR
Prof. Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, SU**

**MAGISTER PROGRAM
STUDY ON GEOPHYSICS SCIENCES
DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF MATHEMATIC AND NATURAL SCIENCES
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2015**

**ANALISIS INVERSI *WAVEFORM* TIGA KOMPONEN UNTUK
MENENTUKAN MOMEN TENSOR, POLA BIDANG SESAR, DAN
MEKANISME FOKUS GEMPA SULAWESI UTARA TAHUN 2014**

**Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Sains (M.Si)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh:

**ISKANDAR ZULKARNAEN
NRP. 1113201003**

**Tanggal Ujian
Periode Wisuda**

**: 25 Juni 2015
: September 2015**

Disetujui Oleh:

**1. Prof. Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, SU
NIP.19620802 198701 1 001**

(Pembimbing)

**2. Dr.rer.nat. Bintoro Anang Subagyo
NIP.19750205 199903 1 004**

(Penguji)

**3. Dr.rer.nat. Eko Minarto
NIP. 19790719 200501 1 015**

(Penguji)

Direktur Program Pascasarjana

**Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
NIP. 19640405 199002 1 001**

ANALISIS INVERSI *WAVEFORM* TIGA KOMPONEN UNTUK MENENTUKAN MOMEN TENSOR, POLA BIDANG SESAR, DAN MEKANISME FOKUS GEMPA SULAWESI UTARA TAHUN 2014

Nama : Iskandar Zulkarnaen
NRP : 1113 201 003
Pembimbing : Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, SU

ABSTRAK

Penelitian mengenai mekanisme fokus gempa Sulawesi Utara telah dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan momen tensor, pola bidang sesar dan mekanisme fokus gempa Sulawesi Utara tahun 2014. Penentuan momen tensor dilakukan dengan inversi waveform tiga komponen dengan metode iterasi dekonvolusi menggunakan software ISOLA-GUI. Momen tensor menggambarkan gaya-gaya yang bekerja pada pusat sumber gempa bumi sedangkan slip menggambarkan besarnya displacement yang terjadi dikarenakan gempa bumi. Dari hasil inversi diperoleh solusi parameter sesar yaitu strike, dip, dan rake untuk dua nodal yang akan dianalisa untuk menentukan bidang patahan. Hasil inversi momen tensor direpresentasikan dengan menggunakan beach ball yang menggambarkan daerah kompresi dan dilatasi. Dari penelitian ini diketahui jika pada gempa Sulawesi Utara didominasi oleh sesar naik (reverse fault) dan oblique. Hal ini dikarenakan gempa Sulawesi Utara disebabkan oleh lempeng Pasifik yang bergerak ke arah barat dan lempeng Eurasia yang bergerak ke arah selatan-tenggara membentuk zona subduksi. Dari hasil penelitian ini didapatkan rentang momen tensor adalah $M_{rr} = 0,302 \times 10^{16}$ sampai $2,845 \times 10^{18}$; $M_{tt} = 1,037 \times 10^{16}$ sampai $1,732 \times 10^{18}$; $M_{pp} = 0,458 \times 10^{16}$ sampai $4,576 \times 10^{16}$; $M_{rt} = 0,524 \times 10^{16}$ sampai $5,103 \times 10^{16}$; $M_{rp} = 0,400 \times 10^{16}$ sampai $3,476 \times 10^{16}$; $M_{tp} = 0,253 \times 10^{16}$ sampai $4,689 \times 10^{18}$. Sedangkan untuk besarnya slip maksimum yaitu mencapai 8,14 cm.

Kata kunci: Gempa Bumi, Momen Tensor, Inversi Waveform Tiga Komponen

ANALYSIS WAVEFORM THREE COMPONENTS INVERSION TO DETERMINE MOMENT TENSOR, PATTERN OF FAULT PLANE, AND MECHANISM FOCUS OF NORTH SULAWESI EARTHQUAKE 2014

Name : Iskandar Zulkarnaen
Student Identity : 1113 201 003
Advisor : Prof.Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, SU

ABSTRACT

This research discussed about determination of moment tensor, the pattern of fault plane, focal mechanism from Sulawesi Utara earthquake 2014. The determination of moment tensor has been done using waveform three component inversion with iteration deconvolution method by ISOLA program. Moment tensor represent forces that exist in focus of earthquake. Whereas, slip represent size of displacement that were caused by earthquake. From inversion result were aimed fault parameter solution (strike, dip, and rake) for two nodal. Inversion result of moment tensor were represent with beach ball that show compression and dilatation zone. From this research were known that the pattern fault in North Sulawesi were dominated by reverse and oblique fault. This pattern fault were caused by subduction between Pasific and Eurasia formed Sulawesi and Molucca trench . From this research also known range of moment tensor were $M_{rr} = 0,302 \exp 16$ to $2,845 \exp 18$; $M_{tt} = 1,037 \exp 16$ to $1,732 \exp 18$; $M_{pp} = 0,458 \exp 16$ to $4,576$; $M_{rt} = 0,524 \exp 16$ to $5,103$; $M_{rp} = 0,400 \exp 16$ to $3,476$; $M_{tp} = 0,253 \exp 16$ to $4,689 \exp 18$. Maximum slip was 8,14 cm and minimum slip was 1,05 cm.

Keywords: Earthquake, Moment Tensor, Inverse Waveform three components.


KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, Sang pencipta langit dan bumi serta segala isinya yang telah melimpahkan rahmat, hidayah, serta kasih sayang-Nya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Tak lupa pula shalawat dan salam penulis panjatkan kepada Rasulullah Muhammad SAW yang telah diutus ke bumi sebagai lentera bagi hati manusia, Nabi yang telah membawa manusia dari zaman kebodohan menuju zaman yang penuh dengan pengetahuan yang luar biasa seperti saat ini. Tesis ini diberi judul:

ANALISIS INVERSI WAVEFORM TIGA KOMPONEN UNTUK MENENTUKAN MOMEN TENSOR, POLA BIDANG SESAR, DAN MEKANISME FOKUS GEMPA BUMI SULAWESI UTARA TAHUN 2014

Dalam penyusunan dan penulisan tesis ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis dengan senang hati menyampaikan terima kasih kepada yang terhormat :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T selaku Direktur PPs-ITS.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Eddy Yahya, M.Sc selaku Ketua Program Studi Fisika PPs-ITS.
3. Bapak Prof. Dr.rer.nat Bagus Jaya Santosa, SU selaku pembimbing yang selalu bijaksana memberikan bimbingan, nasehat serta waktunya selama penelitian dan penulisan tesis ini.
4. Bapak Dr.rer.nat. Bintoro Anang Subagyo dan Bapak Dr.rer.nat. Eko Minarto selaku penguji yang telah memberikan masukan, saran dan nasehat guna kelengkapan tesis ini.
5. Staf Dosen Program Studi Fisika PPs-ITS yang telah membekali penulis dengan berbagai ilmu selama mengikuti perkuliahan sampai akhir penulisan tesis.

- 
6. Ayah dan Ibu atas jasa-jasanya, kesabaran, do'a dan tidak pernah lelah dalam mendidik dan memberi cinta yang tulus dan ikhlas kepada penulis sejak kecil.
 7. Isteri dan anak-anak tercinta, yang selalu setia mendukung, memotivasi dan medoakan dengan tiada henti.
 8. Saudara, kerabat, dan seluruh keluarga besar tercinta yang telah banyak memberikan dorongan, semangat, kasih sayang dan bantuan baik secara moril maupun materiil demi lancarnya penyusunan tesis ini.
 9. Teman-teman semua atas kebersamaan dan bantuan yang berarti bagi penulis.
 10. Semua pihak yang telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan tesis ini.

Semoga Allah SWT memberikan balasan yang berlipat ganda kepada semuanya. Demi perbaikan selanjutnya, saran dan kritik yang membangun akan penulis terima dengan senang hati. Akhirnya, hanya kepada Allah SWT penulis serahkan segalanya mudah-mudahan dapat bermanfaat khususnya bagi penulis umumnya bagi kita semua.

Surabaya, 15 Juni 2015

Penulis

Iskandar Zulkarnaen

DAFTAR ISI

	Hal
LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	ii
ABSTRAC	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB 2. KAJIAN PUSTAKA	5
2.1 Gempa Bumi	5
2.2 Teori Tektonik Lempeng	6
2.3 Teori Elastic Rebound	8
2.4 Gelombang Seismik	9
2.5 Struktur Geologi Sesar	11
2.6 Seismik Momen Tensor	13
2.7 Inversi Waveform Tiga Komponen	15
2.8 Fungsi Green	16
2.9 Mekanisme Fokus	18
2.10 Program ISOLA-GUI	19
2.11 Geologi Tektonik Sulawesi Utara	20
2.11.1 Tektonik Sulawesi Utara dan Sekitarnya	20

2.11.2 Zona Subduksi Sulawesi Utara	21
2.11.3 Sesar Gorontalo	22
2.11.4 Zona Tumbukan Laut Maluku	22
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN.....	23
3.1 Lokasi Penelitian	23
3.2 Peralatan Penelitian	23
3.3 Proses Pengolahan Data	23
3.3.1 <i>Reformatting</i>	23
3.3.2 <i>Pre-Processing</i>	24
3.3.3 Pengolahan Data dengan ISOLA	24
3.4 Perhitungan Data	30
3.4.1 Perhitungan Dimensi Sesar	30
3.4.2 Perhitungan <i>Displacement/Slip</i> Gempa	31
3.5 <i>Flowchart</i> Penelitian	32
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1 Analisa Data	33
4.1.1 Data Penelitian	33
4.2 Hasil Pengolahan	34
4.2.1 Hasil Momen Skalar	34
4.2.2 Hasil Momen Tensor	36
4.2.3 Hasil Mekanisme Fokus Gempa	37
4.2.4 Hasil <i>Slip</i> Sesar Gempa	46
4.3 Pembahasan	47
4.3.1 Momen Tensor	47
4.3.2 Mekanisme Fokus Gempa	50
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	53
5.1 Kesimpulan	53
5.2 Saran	53
DAFTAR PUSTAKA	55
LAMPIRAN	59
BIOGRAFI	69

DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 2.1 Batas Lempeng Bumi	7
Gambar 2.2 Mekanisme Sumber Gempa	9
Gambar 2.3 Deformasi yang Diakibatkan Gelombang Badan	11
Gambar 2.4 Deformasi yang Diakibatkan Gelombang Permukaan	11
Gambar 2.5 Struktur Geologi Sesar	12
Gambar 2.6 Parameter Sesar	13
Gambar 2.7 Pasangan Gaya dari Komponen Momen Tensor	18
Gambar 2.8 Hubungan <i>Focal Spheres</i> dan <i>Fault Geometries</i>	19
Gambar 2.9 Peta Tektonik Utama Pulau Sulawesi	21
Gambar 3.1 Lokasi Penelitian	23
Gambar 3.2 Tampilan <i>Software ISOLA</i>	24
Gambar 3.3 Model Bumi	25
Gambar 3.4 Hasil <i>Plot</i> Model Bumi.....	25
Gambar 3.5 Tampilan pada Tahap Penentuan <i>Event Info</i>	26
Gambar 3.6 Tampilan pada Tahap Penilaian Stasiun	26
Gambar 3.7 Tampilan pada <i>SAC Import</i>	27
Gambar 3.8 Tampilan pada Tahap <i>Raw Data Preparation</i>	27
Gambar 3.9 Tampilan pada Tahap Penentuan Lokasi Seismik	28
Gambar 3.10 Tampilan pada Perhitungan Fungsi Green	28
Gambar 3.11 Tampilan Perhitungan Inversi <i>Waveform</i>	29
Gambar 3.12 <i>Flowchart</i> Penelitian	32
Gambar 4.1 <i>Beach Ball</i> 20140223_15:06:52	38
Gambar 4.2 <i>Beach Ball</i> 20140322_20:46:53	39
Gambar 4.3 <i>Beach Ball</i> 20140504_08:53:58	40
Gambar 4.4 <i>Beach Ball</i> 20140529_01:16:50	40
Gambar 4.5 <i>Beach Ball</i> 20140910_02:46:10	41
Gambar 4.6 <i>Beach Ball</i> 20140910_05:16:57	42
Gambar 4.7 <i>Beach Ball</i> 20140926_18:29:12	43

Gambar 4.8 <i>Beach Ball</i> 20141115_02:31:43	44
Gambar 4.9 <i>Beach Ball</i> 201141115_03:08:05	44
Gambar 4.10 <i>Beach Ball</i> 20141118_04:47:21	45
Gambar 4.11 hasil Inversi <i>Waveform</i> Data Sintetik dan Observasi	48
Gambar 4.12 Hasil Solusi Moment tensor	49
Gambar 4.13 Mekanisme Fokus Gempa	49

DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 4.1 Data <i>Event</i> Gempa Bumi	33
Tabel 4.2 Stasiun Gempa Bumi	34
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Momen Skalar	34
Tabel 4.4 Perbandingan Hasil perhitungan Momen Skalar	35
Tabel 4.5 Momen Tensor Gempa Bumi	36
Tabel 4.6 Bidang Sesar dan <i>Auxiliary Plane</i>	37
Tabel 4.7 Besar <i>Slip</i> Sesar Gempa Bumi	46



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A	Hasil Fitting Kurva Sintetika dan Kurva Seismogram	59
Lampiran B	Hasil Inversi Moment Tensor	64

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Wilayah Indonesia timur khususnya Sulawesi dan sekitarnya merupakan daerah yang kompleks karena merupakan tempat pertemuan tiga lempeng besar yaitu; lempeng Indo-Australia yang bergerak ke arah utara, lempeng Pasifik yang bergerak ke arah barat dan lempeng Eurasia yang bergerak ke arah selatan-tenggara serta lempeng yang lebih kecil yaitu lempeng Filipina. Pertemuan di antara tiga pergerakan lempeng besar tersebut bertemu secara konvergen. Konvergensi ini menimbulkan pengembangan semua jenis struktur di semua skala, termasuk subduksi, dan zona tumbukan, sesar dan *thrust* (Pasau dan Tanauma, 2011). Sehingga pada daerah tersebut sering terjadi gempa bumi.

Sulawesi Utara di sebelah timur terdapat zona subduksi yaitu penunjaman lempeng laut Maluku di bawah busur Kepulauan Sulawesi dan di bawah pulau Halmahera. Sedangkan di sebelah utara terdapat palung laut dalam yang disebut palung Minahasa. Palung ini merupakan tempat penekukan lempengan laut Sulawesi ke bawah busur Kepulauan Sulawesi Utara. Subduksi ini dapat menimbulkan gempa bumi dengan kedalaman dangkal dan menengah di Sulawesi Utara. Jika kedalaman gempanya dangkal dan patahannya adalah patahan naik, maka akan berpotensi terjadi tsunami. Gorontalo menjadi salah satu daerah yang rawan akan bencana gempa bumi. Secara geologi terdapat struktur sesar yang memotong wilayah kota Gorontalo serta melintasi danau Limboto. Kajian tentang struktur sesar ini belum banyak dilakukan.

Belajar dari pengalaman gempa-gempa sebelumnya dengan episenter di darat dan kedalaman dangkal, diperkirakan akibat aktivitas sesar lokal (Abidin et al, 2009) telah menimbulkan korban jiwa dan kerusakan infrastruktur yang cukup besar, maka ancaman yang sama di wilayah yang terindikasi memiliki struktur sesar aktif akan selalu mengintai, maka perlu dilakukan kajian yang lebih mendalam untuk mengurangi ancaman ini dan sebagai upaya mitigasi bencana.

Salah satu yang perlu diketahui adalah mekanisme sumber gempa dan karakteristik arah gerak sesar.

Pemahaman terhadap karakteristik sesar yang mengakibatkan gempa bumi diperlukan untuk memperkirakan atau mengetahui karakter dan akibat kegempaan. Untuk memahami karakteristik ini dapat dilakukan dengan memodelkan momen tensor gempa bumi (Shearer, 2009). Pemodelan momen tensor ini dapat dilakukan dengan menggunakan metode inversi yang memanfaatkan waktu tiba gelombang-P dan diestimasi dengan menggunakan fungsi Green tiga komponen (Zahradnick, 2008). Hasil analisis ini berupa parameter-parameter gempa bumi yang meliputi; skala, kedalaman dan energi gempa bumi serta model patahan penyebab gempa bumi.

Pada penelitian ini akan disajikan mengenai penentuan besarnya momen tensor, pola bidang dan karakteristik sesar dari mekanisme sumber gempa dan besarnya *slip* yang dihasilkan dari gempa bumi di Sulawesi Utara 2014. Pemilihan *event* gempa ini dikarenakan untuk memberikan pemahaman mengenai mekanisme fokus gempa dan karakter sesar terkini dan secara berkelanjutan untuk keperluan mitigasi bencana selanjutnya.

Momen tensor ditentukan dengan menggunakan program ISOLA sehingga dapat diketahui besarnya dan arah gaya penyebab gempa bumi serta parameter sesar yaitu *strike*, *dip* dan *rake* yang nantinya digunakan sebagai inputan untuk menentukan mekanisme fokus dan pengembangan bidang sesar. ISOLA merupakan salah satu perangkat lunak Fortran untuk menghitung momen tensor yang dijalankan dengan GUI Matlab. Kelebihan program ISOLA, adalah dapat digunakan untuk gempa dengan *magnitude* kecil yaitu kurang dari 1,2 SR dan gempa besar yaitu lebih dari 9 SR. Selain itu pengolahan dengan menggunakan program ISOLA melibatkan koreksi instrument dari seismogram yang digunakan, menyediakan *tools* untuk melakukan filter data guna menghilangkan *noise*, sehingga hasil yang didapatkan akan lebih bagus (Sokos & Zahradnick, 2013). Parameter sesar yang dihasilkan dari pengolahan sebelumnya kemudian digunakan untuk *plotting* dengan menggunakan metode H-C. Metode

H-C digunakan untuk melihat penampang sesar dalam bentuk dua dimensi dengan menggunakan dua nodal.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini didesain untuk menganalisa *event* gempa melalui inversi *waveform* tiga komponen menggunakan *software* ISOLA dengan rumusan masalah penelitian adalah:

1. Bagaimana estimasi *Centroid Moment Tensor (CMT)* dari *event* gempa?
2. Bagaimana menentukan pola bidang sesar dan karakteristik sesar dari mekanisme sumber gempa?
3. Berapa besarnya *slip* dari sesar yang dihasilkan *event* gempa bumi?

1.3 Tujuan Penelitian

Mengacu pada rumusan masalah di atas maka tujuan penelitian adalah:

1. Menentukan besarnya momen tensor dari *event* gempa yang terjadi menggunakan inversi *waveform* tiga komponen
2. Menentukan pola bidang sesar dan karakteristik sesar dari mekanisme sumber gempa
3. Menentukan besarnya *slip* dari sesar yang dihasilkan *event* gempa bumi

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah dibatasi pada penentuan mekanisme fokus dari gempa bumi di Sulawesi Utara 2014 dengan menggunakan program ISOLA dengan tinjauan bumi sebagai medium yang isotropis.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah memberikan informasi mengenai pola bidang sesar dan mekanisme fokus gempa bumi di Sulawesi Utara.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika laporan penelitian ini adalah sebagai berikut :

- BAB 1 Pendahuluan, berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, dan sistematika laporan dari penelitian
- BAB 2 Kajian Pustaka, berisi tentang teori-teori yang menjadi landasan penelitian
- BAB 3 Metodologi Penelitian, berisi tentang lokasi penelitian, data penelitian, alat, tahapan penelitian, inversi data menggunakan *waveform* tiga komponen, dan diagram alir penelitian
- BAB 4 Hasil dan Pembahasan, berisi tentang hasil dan analisis penelitian
- BAB 5 Kesimpulan dan Saran

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Gempa Bumi

Gempa bumi adalah getaran tanah yang ditimbulkan oleh lewatnya gelombang seismik yang dipancarkan oleh suatu sumber energi elastik yang dilepaskan secara tiba-tiba. Pelepasan energi elastik tersebut terjadi pada saat batuan di lokasi sumber gempa tidak mampu menahan gaya yang ditimbulkan oleh gerak relatif antar balok batuan, daya tahan batuan menentukan besaran kekuatan gempa. Energi yang dilepaskan pada saat terjadinya patahan tersebut dapat berupa energi deformasi, energi gelombang dan lain-lain. Energi deformasi ini dapat terlihat pada perubahan bentuk sesudah terjadinya patahan, misalnya pergeseran. Sedang energi gelombang menjalar melalui medium elastik yang dilewatinya dan dapat dirasakan sangat kuat di daerah terjadinya gempa bumi tersebut.

Gempa bumi jika diklasifikasikan berdasarkan sebab terjadinya dapat dibedakan sebagai berikut (Bowler, 2003):

1. Gempa Bumi Tektonik

Gempa bumi tektonik adalah gempa bumi yang disebabkan oleh dislokasi atau perpindahan akibat pergeseran lapisan bumi yang tiba-tiba terjadi pada struktur bumi, yakni adanya tarikan atau tekanan.

2. Gempa bumi Vulkanik

Gempa bumi vulkanik adalah gempa bumi yang disebabkan oleh aktivitas gunung api atau letusan gunung api. Pada saat dapur magma bergejolak, ada energi yang mendesak lapisan bumi. Energi yang mendesak lapisan bumi ada yang mampu mengangkat lapisan bumi sampai ke permukaan disertai getaran. Gunung api akan yang akan meletus biasanya mengakibatkan gempa bumi.

3. Gempa Bumi Runtuhan

Gempa bumi runtuh adalah gempa bumi yang disebabkan runtuhnya atap gua atau terowongan tambang di bawah tanah. Jika batuan pada atap

rongga atau pada dinding rongga mengalami pelapukan, maka rongga dapat runtuh karena tidak mampu lagi menahan beban di atas rongga.

Runtuhnya gua dan terowongan yang besar mengakibatkan getaran yang kuat.

Singkatnya gempa bumi merupakan gerakan tanah yang terjadi secara tiba-tiba dan bersifat *transient* (sesaat) dimana sumber getarannya berasal dari mantel bumi atau kerak bumi yang dapat menyebabkan kerusakan di permukaan bumi. Hampir 90% gempa bumi yang terjadi adalah gempa bumi vulkanik dan runtuh.

Gempa bumi tektonik yaitu gempa bumi yang terjadi akibat pergerakan lempeng di kerak bumi. Pergerakan lempeng-lempeng khususnya lempeng raksasa (lempeng mayor) akan menimbulkan gesekan-gesekan, tekanan dan desakan pada bidang pertemuannya. Tekanan yang timbul akibat pergerakan lempeng-lempeng tersebut terus membesar. Maka, pada suatu saat ketika tidak dapat menahan tekanan tersebut, batuan menjadi pecah dan terangkat. Pelepasan tekanan ini menimbulkan getaran atau gelombang. Gelombang kemudian menyebar ke segala penjuru dari titik dimana batuan pecah atau terangkat dan menghasilkan guncangan/getaran pada bumi yang disebut gempa bumi.

Gempa bumi banyak terjadi di batas lempeng hal ini disebabkan karena pergerakan lempeng yang dinamis dimana lempeng tersebut bergerak secara perlahan dan energi *strain* terakumulasi bertahun-tahun dan jika tiba-tiba terjadi *slip* inilah yang mengakibatkan gempa bumi (Afnimar, 2009).

2.2 Teori Tektonik Lempeng

Teori tektonik lempeng awalnya berasal dari hipotesa Alfred Wegener (1912) yang mengemukakan bahwa benua-benua yang ada sekarang ini dahulu adalah satu bentang muka benua raksasa yang disebut dengan Pangea. Teori Alfred Wegener ini dikenal dengan nama teori *continental drift* (apungan benua). Namun seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan, teori ini tidak dapat dibuktikan secara ilmiah.

Teori tektonik lempeng berisikan teori mengenai pergerakan lempeng-lempeng bumi di dalam kerak bumi. Teori ini menggantikan teori apungan benua yang dikemukakan oleh Alfred Wegener. Teori tektonik lempeng menyatakan bahwa kerak bumi tersusun atas beberapa lempeng tektonik yang terus menerus bergerak secara dinamis. Lempeng-lempeng ini mengapung di atas asthenosfer yang bersifat cair dan panas.

Adanya gaya tektonik yang timbul akibat arus konveksi di dalam kerak bumi akan mengakibatkan lempeng bergerak, bertumbukan dan bergeser satu sama lain. Lempeng-lempeng tektonik akan terus bergerak ada yang saling mendekat dan ada pula yang saling menjauh (Harmadhoni, 2011).



Gambar 2.1 Batas Lempeng Bumi

Perbatasan lempeng satu dengan yang lain merupakan daerah yang paling aktif. Berdasarkan pergerakan lempeng tektonik batas lempeng tektonik dibedakan menjadi 3 macam yaitu:

1. Batas Konvergen

Batas konvergen terjadi ketika dua lempeng tektonik saling mendekat yang menyebabkan terjadinya tumbukan karena kedua lempeng terus bergerak mendekat. Karena tumbukan ini akan terjadi penunjaman sehingga lempeng yang densitasnya lebih besar akan menunjam ke bawah sehingga terbentuk zona subduksi. Batas konvergen terjadi jika lempeng benua dan lempeng samudra bergerak saling mendekat. Aktivitas lempeng

tektonik semacam ini akan mengakibatkan terbentuknya rangkaian gunung berapi.

2. Batas Divergen

Batas divergen terjadi ketika dua lempeng tektonik bergerak saling menjauh yang dikenal dengan zona pemekaran (*spreading*).

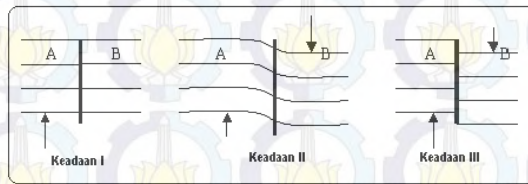
3. Batas Singgungan

Batas singgungan ditandai dengan dua lempeng yang saling bergerak relatif sejajar satu dengan yang lain sehingga terjadi gesekan pada bidang batas lempeng. Akibat gesekan ini akan timbul gempa-gempa dangkal (Isnawati, 2011).

2.3 Teori Elastic Rebound

Teori *elastic Rebound* atau bingkai elastik adalah teori yang menjelaskan mengenai mekanisme terjadinya gempa bumi yang diakibatkan oleh pensesaran batuan/lapisan. Konsep dari teori ini menyatakan jika gempa bumi terjadi akibat proses pensesaran di dalam kerak bumi yang diakibatkan oleh pelepasan energi secara mendadak dari tegangan elastik yang melampaui batas kekuatan batuan. Tegangan elastik ini terakumulasi apabila batuan mengalami deformasi yang terus-menerus dan besarnya semakin besar. Jika tegangan elastik yang terakumulasi melebihi batas elastisitas batuan maka batuan akan terpecah dan membentuk sesar. Bersamaan dengan proses tersebut akan dilepaskan energi dalam bentuk getaran gelombang elastik yang menjalar dalam bumi yang bisa dirasakan yaitu gempa bumi.

Berdasarkan teori *elastic rebound*, gempa bumi terjadi melalui tahapan berikut yaitu diantaranya, (1) gempa disebabkan karena pergerakan lempeng tektonik sehingga mengakibatkan timbulnya gaya tektonik dan mengakibatkan terjadinya pergeseran antara blok batuan, (2) ketika tegangan yang diterima batuan melebihi batas ambang elastisitas maka batuan akan pecah proses ini dikenal dengan *rupture* (3) selama proses *rupture* energi elastik batuan akan dipancarkan ke segala arah menuju permukaan dalam bentuk gelombang seismik (Madlazim, 2011).



Gambar. 2.2 Mekanisme Sumber Gempa (Teori Elastic Rebound)

Hal di atas awalnya disebabkan karena adanya pergerakan lempeng bumi di dalam kerak bumi yang tidak stabil dan bergerak terus-menerus sehingga mengakibatkan terjadinya *stress* yang terakumulasi dan dapat merubah geologi lapisan batuan (Isnawati, 2011).

2.4 Gelombang Seismik

Gelombang seismik adalah gelombang yang merambat naik di dalam ataupun di permukaan bumi yang berasal dari sumber seismik seperti sumber gempa bumi, letusan gunung berapi, ledakan dan lain sebagainya. Gelombang seismik tergolong dalam gelombang mekanik, dimana dalam perambatannya membutuhkan medium. Gelombang gempa bumi juga dikatakan sebagai gelombang elastik karena dalam perambatannya melalui perantara batuan yang termasuk dalam medium elastik. Persamaan gelombang seismik dapat dituliskan:

$$\rho \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla \nabla \cdot \bar{u} - \mu \nabla \times \nabla \times \bar{u} \dots \dots \dots (2.1)$$

(Afnimar, 2009)

Gelombang seismik dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok yaitu gelombang badan (*body wave*) dan gelombang permukaan (*surface wave*).

1. Gelombang Badan (*Body Wave*) adalah gelombang yang merambat melalui lapisan dalam bumi. Gelombang badan merambat di dalam medium yang dilaluinya. Gelombang badan dibedakan menjadi dua jenis gelombang yaitu:

- a. Gelombang Primer (*P-wave*)

Gelombang-P merupakan gelombang *longitudinal* yang arah osilasi partikelnya searah dengan arah rambat gelombang. Gelombang-P

merupakan gelombang tiba paling awal di permukaan bumi karena memiliki kecepatan yang paling tinggi diantara gelombang yang lain (Afnimar, 2009). Gelombang P dapat menjalar di semua medium baik padat, cair ataupun gas (Ismawati, 2001).

b. Gelombang Sekunder (*S-wave*)

Gelombang-S merupakan gelombang *transversal* yang gerak partikelnya tegak lurus dengan arah rambatnya. Berbeda dengan gelombang-P gelombang-S hanya dapat menjalar pada medium padat. Ada dua tipe gelombang-S yaitu gelombang SV (*shear vertical*) dan gelombang SH (*shear horizontal*) (Isnawati, 2001).

2. Gelombang Permukaan (*Surface Wave*) adalah gelombang yang merambat melalui permukaan bumi. Gelombang permukaan merambat sejajar dengan medium yang dilaluinya. Gelombang permukaan dibedakan atas:

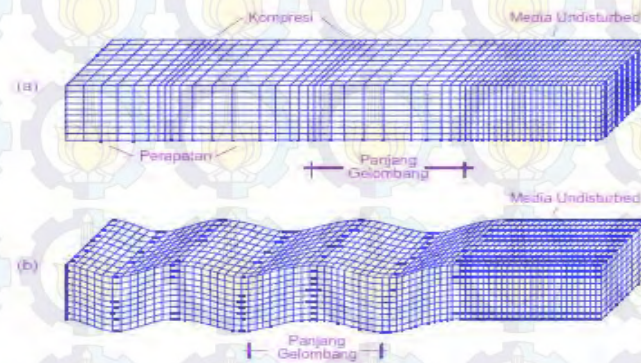
a. Gelombang *Love* adalah gelombang yang terbentuk akibat adanya interferensi gelombang-gelombang pantul dengan gelombang SH pada suatu lapisan yang dekat dengan permukaan bumi. Gerak partikel yang dilewati oleh gelombang *Love* sama pada saat medium tersebut dilewati oleh gelombang SH hanya saja besarnya amplitudo berkurang terhadap kedalaman (Afnimar, 2009).

b. Gelombang *Rayleigh*

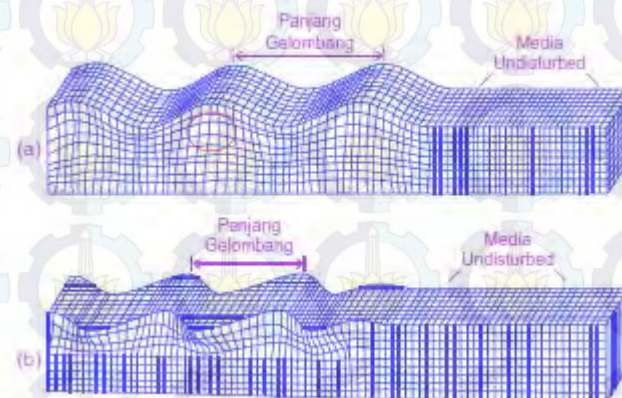
Gelombang *Rayleigh* adalah gelombang yang terbentuk akibat adanya interferensi gelombang-gelombang pantul dan gelombang SV yang sudut datangnya melebihi sudut kritis. Gerak partikel medium yang dilewati berbentuk ellips yang merupakan kombinasi gerak gelombang pantul dan SV. Amplitudo gelombangnya turun terhadap kedalaman (Afnimar, 2009).

Gelombang permukaan bersifat dispersif yaitu kecepatan gelombangnya bergantung pada frekuensi gelombang. Semakin besar frekuensi maka semakin kecil kecepatannya dan penetrasi gelombangnya semakin dangkal dan sebaliknya (Afnimar, 2009). Gelombang permukaan lebih berbahaya jika dibandingkan

dengan gelombang badan karena amplitudonya yang lebih besar. Gelombang permukaan inilah yang bersifat merusak jika terjadi gempa bumi.



Gambar 2.3 Deformasi yang Diakibatkan Oleh Gelombang Badan;
(a) P-Waves dan (b) S-V Waves, (Kramer, 1996)



Gambar 2.4 Deformasi yang Diakibatkan oleh Gelombang Permukaan;
(a).Gelombang Rayleigh dan (b).Gelombang Love, (Kramer, 1996)

2.5 Struktur Geologi Sesar

Sesar didefinisikan sebagai rekahan/retakan pada batuan penyusun bumi yang telah atau sedang mengalami pergeseran (*displacement*). Sesar yang terjadi selama gempa bumi berlangsung dapat diestimasi dengan menggunakan metode yang berdasarkan pada waktu tiba pertama (*first motion*) dari gelombang-P (Lay et al., 1995). Sesar dapat dibedakan menjadi beberapa macam berdasarkan karakteristik gerakannya yaitu sebagai berikut:

1. Sesar tidak mendatar yaitu sesar yang arah Bergeraknya blok sesar vertikal atau miring atau biasa disebut dengan sesar *dip-slip*. Sesar ini terdapat tiga jenis yaitu:

- a. Sesar Turun (*Normal Fault*)

Sesar turun memiliki karakteristik *hanging wall* akan relatif turun terhadap *foot wall*. Sesar normal terjadi jika nilai δ (*dip*) $\neq 0$ dan $\delta \neq \pi/2$ serta nilai λ (*rake*) dalam rentang $180^\circ \leq \lambda \leq 0^\circ$. Sesar turun mempunyai bidang kemiringan yang besar.

- b. Sesar Naik (*Reverse Fault*)

Sesar naik memiliki karakteristik *hanging wall* akan relatif naik terhadap *foot wall*. Sesar naik terjadi jika nilai δ (*dip*) $\neq 0$ dan $\delta \neq \pi/2$ serta nilai λ (*rake*) dalam rentang $180^\circ \leq \lambda \leq 0^\circ$.

- c. Sesar *Oblique*

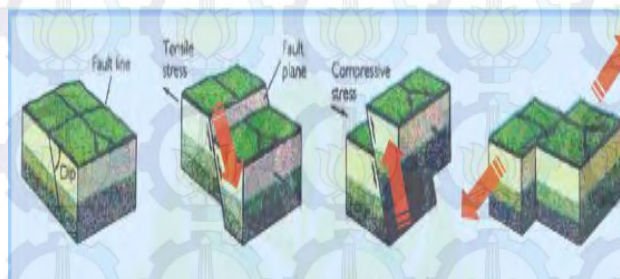
Pergerakan dari sesar ini gabungan antara horizontal dan vertikal sehingga membentuk arah diagonal. Gaya-gaya yang bekerja menyebabkan sesar mendatar dan sesar normal $\delta = 90^\circ$ dan $\lambda = 0^\circ$ (bergeser ke kiri) dan $\lambda = 180^\circ$ (bergeser ke kanan).

2. Sesar Mendatar

Sesar mendatar atau *strike-slip fault* yaitu sesar yang arah Bergerak blok sesar secara horizontal. Sesar ini terbagi dua yaitu:

- a. *Right lateral* yaitu gerak sesar mendatar yang searah dengan jarum jam
- b. *Left lateral* yaitu gerak sesar mendatar yang berlawanan dengan arah jarum jam

(Rahmania et al., 2010)



Gambar. 2.5 Struktur Geologi Sesar

Dalam menganalisa bentuk sesar dilakukan dengan menganalisa parameter-parameter sesar diantaranya sebagai berikut:

1. *Strike* (ϕ)

Strike adalah sudut yang digunakan untuk menentukan orientasi *fault* dan diukur searah jarum jam dari arah utara. Sebagai contoh jika *strike* 0° atau 180° menunjukkan orientasi *fault* pada arah utara-selatan dan jika *strike* 90° atau 270° menunjukkan orientasi *fault* pada arah timur-barat. Besar *strike* mulai dari 0° sampai dengan 360° .

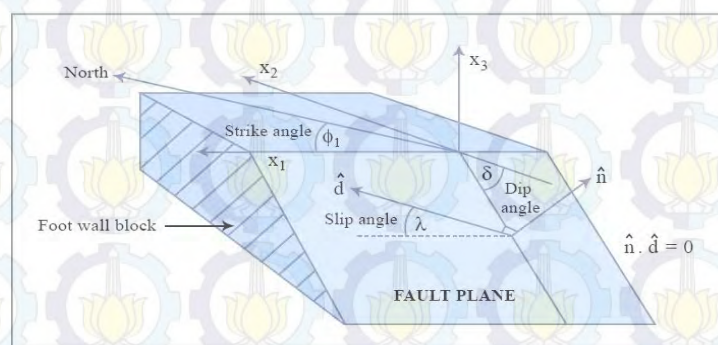
2. *Dip* (δ)

Dip adalah sudut yang menggambarkan kecuraman *fault*. Sudut ini diukur dari permukaan bumi atau paralel dengan bidang sesar. Sudut *dip* antara 0° sampai dengan 90° .

3. *Slip*

Dip dan *strike* menggambarkan orientasi *fault* sedangkan kemana arah gerakan *fault* digambarkan oleh parameter *slip*. *Slip* memiliki dua komponen pergeseran yang menginformasikan seberapa jauh batuan bergerak dan arah pergeserannya. Pergeseran *slip* biasanya hanya beberapa sentimeter untuk gempa kecil dan beberapa meter untuk gempa besar. Sedangkan untuk arah slip dihitung dari permukaan sesar.

(Madlazim, 2011)



Gambar 2.6 Parameter Sesar (*Strike*, *Dip*, *Slip*)

2.6 Seismik Momen Tensor

Gempa bumi disebabkan adanya gerakan suatu sesar dengan karakter gerak tertentu. Model gerak sesar karakter sesar penyebab gempa bumi dapat diketahui berdasarkan momen tensor gempa bumi. Momen tensor ini digunakan

untuk menggambarkan arah gaya penyebab gempa bumi (Setyowidodo dan Santosa, 2011). Ketika suatu gempa bumi terjadi, gelombang seismik itu disebarkan dari hiposenter yang akan membawa banyak informasi dari mekanisme sumber gempa bumi. Dari gelombang seismik kita dapat menaksir suatu retakan yang mendadak berlangsung sepanjang sesar. Analisa momen tensor pada jarak-jarak lokal, telesismik dan regional sudah menjadi suatu praktek yang rutin di dalam ilmu gempa. Momen tensor seismik berisi tidak hanya informasi suatu ukuran gempa bumi tapi juga informasi suatu keadaan dari tekanan permukaan tektonik dan berisi suatu zona yang lemah/zona sesar (Suardi, 2006).

Seismik momen tensor memiliki 9 komponen momen tensor namun diantaranya terdapat momen tensor yang selalu simetris sehingga seismik momen tensor hanya memiliki 6 komponen dasar yang independen (Lay et al., 1995). Seismik momen tensor untuk bentuk tiga dimensi dapat dituliskan sebagai:

$$M = \begin{bmatrix} M_{xx} & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & M_{yy} & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & M_{zz} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.2)$$

Momen tensor yang disimbolkan dengan M_{xy} mempunyai arti komponen gaya bekerja pada bidang normal terhadap sumbu x dan yang bergerak ke arah sumbu y begitu pula dengan momen tensor untuk komponen gaya yang lain (Afnimar, 2009). Sifat momen tensor ialah simetris, artinya M_{xy} sama dengan M_{yx} . Nilai komponen M_{xy} tersebut dapat digunakan untuk mengetahui parameter *strike*, *dip* dan *rake* penyebab gempa bumi. Selanjutnya, momen tensor ini dapat digunakan untuk mengukur kekuatan gempa bumi dengan menggunakan parameter momen seismik (M_0).

Untuk memahami karakteristik gempa dilakukan dengan memodelkan momen tensor gempa bumi (Lay and Wallace, 1995; Kayal, 2008). Dalam memodelkan momen tensor dapat dilakukan dengan menggunakan metode inversi yang memanfaatkan *waveform* ataupun waktu tiba gelombang-P (Kayal, 2008; Sokos dan Zahradnick, 2008). Pada analisis ini, digunakan inversi

waveform lokal tiga komponen. Parameter-parameter sumber gempa bumi ini diestimasi dengan menggunakan model inversi untuk mencapai *fitting waveform* tiga komponen dengan baik. Proses inversi yang baik didasarkan hasil pencocokan data observasi dan data sintetik hasil inversi. Hasil yang baik terjadi saat data observasi dan data sintetik saling tumpang tindih (Sokos & Zahradnick, 2013).

2.7 Inversi Waveform Tiga Komponen

Informasi mengenai parameter gempa (hiposenter, kekuatan gempa, momen seismik, momen tensor, orientasi bidang sesar, pola dan luas bidang sesar) penting untuk diketahui karena hal ini terkait dengan resiko yang diakibatkan oleh gempa bumi di permukaan. Untuk mendapatkan parameter sumber gempa dapat dilakukan dengan metode inversi *waveform* tiga komponen, yakni proses inversi yang melibatkan ketiga komponen dari seismogram meliputi komponen vertikal, komponen utara-selatan, dan komponen barat-timur.

Metode inversi merupakan salah satu metode geofisika yang kerap kali digunakan untuk memprediksi kenampakan dibawah permukaan bumi. Dalam ilmu geofisika, teori inversi secara luas dikembangkan dengan tujuan untuk mengambil kesimpulan tentang interior bumi dari sekumpulan data fisika yang diamati di permukaan. Pemecahan inversi biasanya dilakukan dengan mencari suatu model optimum dimana respon yang dihasilkan mendekati dengan data pengamatan. Hal ini dilakukan dengan meminimumkan suatu fungsi objektif tertentu yang menggambarkan seberapa dekat data pengamatan dengan respon hasil perhitungan (data sintetik) suatu model (Menke, 1993).

Masalah inversi yang akan diselesaikan adalah menentukan suatu himpunan model parameter yang tidak diketahui yaitu $m = [m_i]$ ($i=1,2,3,\dots,N$) dari himpunan data hasil pengamatan yaitu $d = [d_i]$ ($i=1,2,3,\dots,N$).

Masalah inversi momen tensor, jenis inversi yang digunakan adalah inversi linier dengan permasalahannya bersifat *over-determined* dimana jumlah data jauh lebih banyak daripada jumlah parameter model. Untuk data dengan parameter suatu fungsi linier dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1m} \\ G_{21} & G_{22} & \ddots & G_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{N1} & G_{N2} & \dots & G_{Nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_m \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.3)$$

Sehingga didapatkan solusi inversi linier dari parameter model (m) sesuai dengan persamaan:

$$m = [G^T G]^{-1} G^T d \dots\dots\dots (2.4)$$

(Masykur, 2011)

Dengan menggunakan inversi momen tensor, proses sumber gempa secara detail dapat didapatkan dari pengamatan data. Momen tensor untuk berbagai jenis gempa dapat ditentukan secara rutin. Juga mencoba dan melakukan modeling kesalahan dengan memperlakukan secara hati-hati dan seksama dari data tersebut dapat menghasilkan pengetahuan penting sekitar sumber gempa (Yoshida, 1995).

2.8 Fungsi Green

Fungsi Green merupakan salah satu metode penting dalam fisika, baik dalam tinjauan klasik maupun tinjauan kuantum. Secara umum fungsi Green digunakan untuk mengkonstruksi solusi persamaan differensial tak homogen.

Cara yang biasa digunakan untuk merumuskan fungsi Green adalah dengan menggunakan transformasi Fourier. Tetapi metode ini kurang sesuai jika diterapkan ke dalam masalah-masalah dalam mekanika kuantum yang kompleks. Cara lainnya adalah dengan menggunakan metode integral lintasan. Integral lintasan merupakan salah satu metode yang banyak digunakan untuk menyelesaikan berbagai problem kuantum. Konsep fungsi Green ini digunakan untuk momen tensor dari data *event* gempa. Secara matematis fungsi Green dapat dituliskan sebagai:

$$U_k(r,t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(r, ct) f(c,t) d^3c \dots\dots\dots (2.5)$$

Sehingga komponen rekaman seismik dari sebuah sumber gempa dapat dinyatakan dengan:

$$U_k(r,t) = \sum_{i=1}^6 G_{ki}(r,c,t) * f_i(c,t) \dots\dots\dots(2.6)$$

dimana: U_k adalah rekaman pergeseran pada komponen ke-k, r adalah posisi receiver, c adalah posisi sumber gempa (centroid), G_{ki} adalah fungsi Green, $f_i(c,t)$ menyatakan enam komponen independen momen tensor. Jika fungsi Green diekspansikan dengan menggunakan deret Taylor dengan posisi sumber c , maka dapat diperoleh persamaan untuk momen tensor yaitu:

$$M_{jk} = \iiint c_k f_{jn}(c,t) d^3c \dots\dots\dots(2.7)$$

dimana M_{jk} adalah komponen momen tensor pada arah k dengan bidang normal j (Aki dan Richard, 1980). Dari hasil menggunakan fungsi Green di atas didapatkan besar dan arah momen tensor pada masing-masing komponen.

Besarnya momen tensor kemudian digunakan untuk memperoleh parameter sesar diantaranya *strike*, *dip*, dan *slip*. Adapun secara matematis dapat dituliskan sebagai:

$$M_{xx} = -M_0(\sin\delta.\cos\lambda.\sin2\phi + \sin2\delta.\cos\lambda.\sin2\phi) \dots\dots\dots(2.8)$$

$$M_{xy} = M_{yx} = M_0(\sin\delta.\cos\lambda.\sin2\phi + \frac{1}{2}.\sin2\delta.\cos\lambda.\sin2\phi) \dots\dots\dots(2.9)$$

$$M_{xz} = M_{zx} = -M_0(\cos\delta.\cos\lambda.\cos\phi + \cos2\delta.\sin\lambda.\sin2\phi) \dots\dots\dots(2.10)$$

$$M_{yy} = M_0(\sin\delta.\cos\lambda.\sin2\phi - \sin2\delta.\sin\lambda.\cos2\phi) \dots\dots\dots(2.11)$$

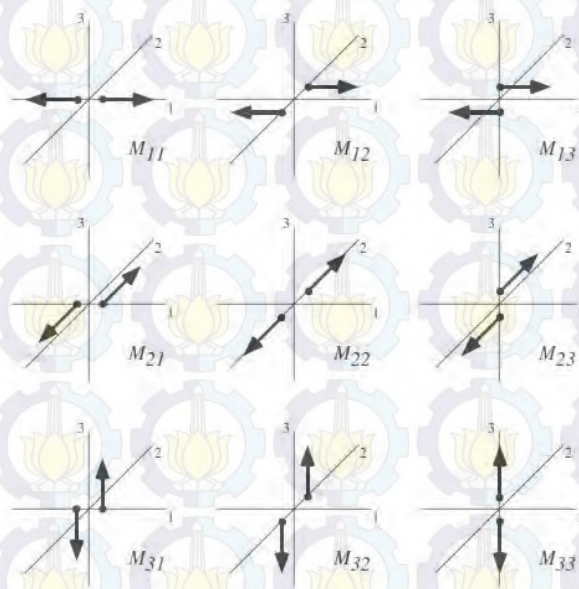
$$M_{yz} = M_{zy} = -M_0(\cos\delta.\cos\lambda.\sin\phi - \cos2\delta.\sin\lambda.\cos\phi) \dots\dots\dots(2.12)$$

$$M_{zz} = M_0(\sin2\delta.\sin\lambda) \dots\dots\dots(2.13)$$

(Thorne et al., 1995)

Karena bumi kita berbentuk *spherical* maka komponen momen tensor pada umumnya diubah menjadi komponen radial dan transversal. Komponen momen tensor dalam koordinat bola adalah:

$$\begin{array}{lll} M_{tt} = M_{xx} & M_{pp} = M_{yy} & M_{rr} = M_{zz} \\ M_{tp} = -M_{xy} & M_{rt} = M_{xz} & M_{rp} = -M_{yz} \end{array} \dots\dots\dots(2.14)$$

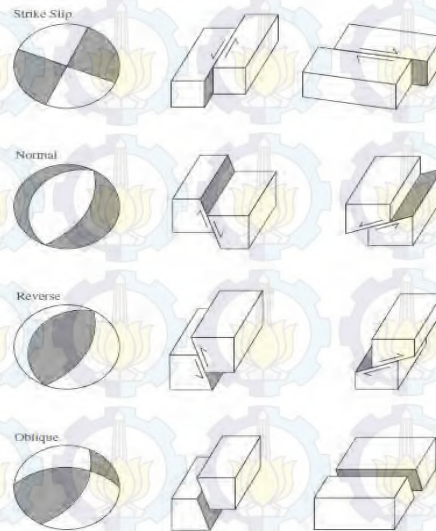


Gambar 2.7 Pasangan Gaya dari Komponen Momen Tensor (Shearer, 2009)

2.9 Mekanisme Fokus

Mekanisme fokus gempa atau *focal mechanism* adalah istilah yang digunakan untuk menerangkan sifat penjaran energi gempa bumi yang berpusat pada hiposenter atau fokus gempa. Ketika gempa bumi terjadi maka gelombang seismik akibat gempa bumi akan terpancarkan ke segala arah berbentuk fase gelombang. Fase awal yang tercatat lebih dulu adalah gelombang-P karena memiliki kecepatan yang paling besar dibandingkan dengan gelombang lain. Arah gerakan gelombang-P pertama yang terekam oleh seismogram inilah yang kemudian dimanfaatkan untuk mempelajari mekanisme fokus. Hal ini disebabkan karena gelombang-P yang paling jelas pembacaannya dan mudah untuk teramati. Selain itu juga digunakan polaritas dan amplitudo gelombang S serta inversi momen tensor dalam penentuan mekanisme fokus (Harmadhoni, 2011). Gelombang-P yang pertama kali terekam oleh seismogram dapat memberikan informasi mengenai arah gaya yang bekerja pada saat gempa bumi dan juga penjaran gelombang-P ke seismogram sangat bergantung pada mekanisme fokus sumber gempa. Sehingga karena data yang kita punyai tentunya hanya waktu datang gelombang-P yang diperoleh dari *event* gempa yang tercatat di seismogram, untuk mengetahui mekanisme fokus dari suatu gempa dapat

dilakukan dengan menggunakan metode inversi gelombang-P (Rahmania dkk., 2010).



Gambar 2.8 Hubungan *Focal Spheres* dan *Fault Geometries* (Shearer, 2009)

Solusi dari mekanisme fokus sumber gempa disediakan dalam penggambaran beach ball, dari sini kemudian diketahui karakteristik atau jenis sesar apa yang terjadi selama gempa bumi dan arah gaya penyebab gempa bumi dalam solusi momen tensor.

2.10 Program ISOLA-GUI

Program ISOLA-GUI merupakan program yang menggunakan *tool* Matlab dan bertujuan untuk mempermudah menghitung dengan Fortran dengan cepat seperti persiapan data, perhitungan Fungsi Green dan proses inversi serta hasil dalam bentuk gambar grafis dari *focal mechanism* (Sokos dan Zahrandik, 2008).

Sokos (2009) menjelaskan bahwa Program ISOLA berdasarkan pada representasi multiple *point-source* dan metode iterasi dekonvolusi seperti yang digunakan oleh Kikuchi dan Kanamori (1991) untuk data gempa teleseismik. Dan untuk menghitung Fungsi Green menggunakan metode *discrete wavenumber* oleh Bouchon. Metode ini baik digunakan untuk gempa lokal dan regional. Inversi yang digunakan dalam program ini adalah inversi linier dengan d merupakan data dan m adalah parameter yang dicari.

$$d = Gm \dots\dots\dots(2.15)$$

yang dapat diselesaikan dengan metode *least-square*

$$m = (G^T G)^{-1} G^T d \dots\dots\dots(2.16)$$

ISOLA-GUI digunakan untuk menjelaskan *focal mechanism* dari momen tensor gempa. Dari proses inversi dapat diketahui besar nilai eigen dan vektor eigennya. Vektor eigen memberikan nilai *strike*, *dip*, dan *rake (slip)*. Nilai eigen memberikan besar momen skalar M_0 . Untuk mendapatkan hasil yang bagus, maka dilakukan *fitting* kurva *displacement* untuk data sintetik dengan data lapangan. Dimisalkan, d adalah data lapangan dan s adalah data sintetik. Kecocokan (*fit*) diantara kedua data diukur dengan *variance reduction (varred)* dengan persamaan,

$$varred = 1 - \frac{|d-s|^2}{d^2} \dots\dots\dots(2.17)$$

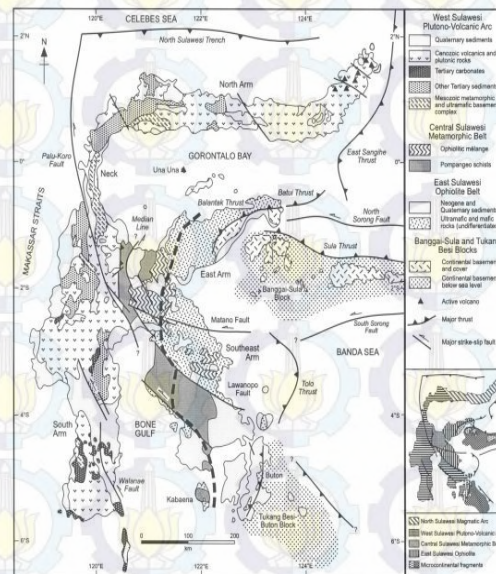
Nilai 1 menunjukkan kurva data sintetik berimpit dengan kurva data observasi, apabila kurang dari satu, maka terjadi perbedaan pada kurvanya sehingga akan menghasilkan ketidakcocokan perhitungan antara besar *event* yang ada dengan hasil pengolahan. Ketidakcocokan ini dipengaruhi oleh penentuan jumlah *subevent* yang akan menghasilkan residual data yang berpengaruh pada nilai *vared*. Selain, jumlah *subevent*, proses *filtering* berpengaruh pada periode yang akan digunakan oleh program ISOLA-GUI dari data *seismogram* dalam proses perhitungan inversi (Sokos dan Zahrandik, 2009).

2.11 Geologi Tektonik Sulawesi Utara

2.11.1 Tektonik Sulawesi Utara dan Sekitarnya

Pulau Sulawesi dan sekitarnya, khususnya Sulawesi bagian utara merupakan salah satu margin aktif yang paling rumit dalam jangka waktu geologi, struktur dan juga tektonik. Wilayah ini merupakan pusat pertemuan tiga lempeng konvergen, karena interaksi tiga kerak bumi utama (lempeng) di masa Neogen (Simandjuntak, 1992). Konvergensi ini menimbulkan pengembangan semua jenis struktur di semua skala, termasuk subduksi dan zona tumbukan, sesar

dan *thrust*. Saat ini sebagian besar struktur Neogen dan beberapa struktur pra-Neogen masih tetap aktif atau aktif kembali. Struktur utama termasuk Subduksi Sulawesi Utara (*North Sulawesi Trench /Minahasa Trench*), Sesar Gorontalo, Sulu Thrust, dan tumbukan ganda laut Maluku (*Molluca sea collition*) seperti ditampilkan dalam Gambar 2.9



Gambar 2.9 Peta Tektonik Utama Pulau Sulawesi (Hall dan Wilson, 2000)

2.11.2 Zona Subduksi Sulawesi Utara

Subduksi Sulawesi Utara (*North Sulawesi Trench*) diinterpretasikan merupakan zona subduksi konvergen antara Laut Sulawesi dan Lengan Utara Sulawesi. Zona subduksi Sulawesi Utara termasuk kedalam sistem penunjaman yang relatif tua (*dying subduction*) yang robekannya berkembang ke arah timur sepanjang tepian utara Sulawesi. Penunjaman Sulawesi Utara menyusup dengan sudut kemiringan sekitar 14° dan *zone benioff* menonjol sampai kedalaman 170-180 km, dengan sudut kemiringan sekitar 45° . Magnitudo maksimum (M_{max}) gempa bumi di zona Subduksi Sulawesi Utara mencapai 8,0 dengan periode ulang gempa bumi sekitar 234 tahun (Kertapati, 2006).

2.11.3 Sesar Gorontalo

Pada bagian utara Pulau Sulawesi, secara morfologi akan terlihat kenampakan empat segmen sesar (Hall dkk, 2000). Bagian tengah dari utara Pulau Sulawesi terbagi kedalam tiga block yang kecil. Pada bagian timur dari lengan utara Pulau Sulawesi diberi nama Block Manado, yang bebas dari pengaruh North Sula Block. Sehingga secara geologi jelas terlihat pemisahan yang diakibatkan adanya Sesar Gorontalo. Sesar Gorontalo yang memanjang dari arah barat laut ke tenggara yaitu mulai Laut Sulawesi melewati Gorontalo hingga perairan Teluk Tomoni, dan mekanisme sesarnya adalah sesar mengangan (*right lateral slip*).

2.11.4 Zona Tumbukan Laut Maluku

Di bawah zona tumbukan Laut Maluku yang memanjang dalam arah utara selatan telah diamati adanya suatu penunjaman *slab* dari lempeng laut Maluku dengan konfigurasi penunjaman yang sangat unik, dimana *slab* dari lempeng yang sama menunjam ke dua arah yaitu barat dan timur berbentuk seperti U terbalik. Berdasarkan tomogram kartun 3D, nampak bahwa konfigurasi *slab* lempeng laut Maluku yang menunjam ke barat mempunyai kemiringan yang lebih tajam daripada yang tersubduksi ke timur. Hal ini barangkali disebabkan oleh bergesernya seluruh sistim tumbukan di Maluku ke barat oleh akibat desakan dari lempeng Pasifik yang bergerak ke barat (Widiyantoro, 2007).

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian adalah di Sulawesi Utara. Data gempa yang digunakan adalah data gempa bumi tahun 2014.



Gambar 3.1 Lokasi penelitian

3.2 Peralatan Penelitian

Peralatan untuk melakukan penelitian ini adalah data gempa Sulawesi Utara pada tahun 2014, *software* ISOLA, *software* hc-plot, *software* MATLAB, dan *software* Winquake.

3.3 Proses Pengolahan Data

Proses pengolahan data penelitian adalah sebagai berikut :

3.3.1 *Reformatting*

Reformatting adalah proses mengubah format data dari .SEED menjadi .SAC. Proses ini bertujuan agar data dapat dibaca oleh *software* ISOLA dan dilakukan pengolahan selanjutnya. Proses *reformatting* menggunakan *software* Jrdseed dengan menggunakan *command prompt*. Hasil keluaran

dari proses *reformatting* adalah data dengan format .SAC yang memiliki 3 komponen yaitu BHE, BHN, dan BHZ.

3.3.2 Pre-Processing

Tahap *pre-processing* adalah tahap persiapan sebelum dilakukan pengolahan data. Tahapan ini terdiri dari pertama menyiapkan PLSTA.stn yang terdapat pada folder ISOLA yang berisi informasi mengenai nama stasiun, *latitude* dan *longitude*. Informasi mengenai *latitude* dan *longitude* masing-masing stasiun didapatkan dengan menggunakan *software* Winquake. Kemudian yang kedua menyiapkan pzfiles pada folder ISOLA yang disesuaikan dengan *respon file* untuk masing-masing komponen tiap stasiun.

3.3.3 Pengolahan Data dengan ISOLA

Pengolahan data menggunakan ISOLA bertujuan untuk mencari momen tensor dari data gempa, menentukan jenis sesar penyebab gempa bumi serta mendapatkan parameter-parameter gempa seperti *strike*, *dip* dan *rake*. ISOLA merupakan program yang menggunakan tool MATLAB sehingga untuk menjalankan program ISOLA dilakukan dengan memanggilnya di MATLAB.



Gambar 3.2 Tampilan *software* ISOLA

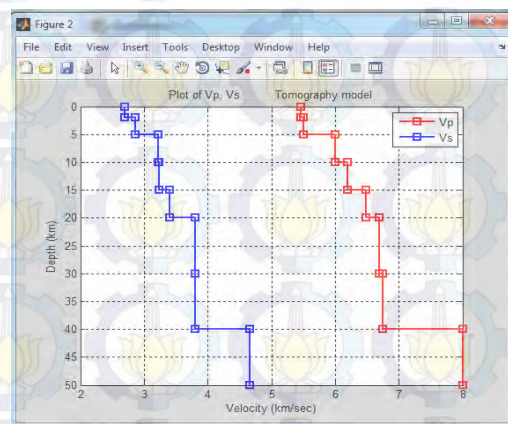
Di dalam program ISOLA ada beberapa tahapan proses sebagai berikut :

1. Menentukan Model Bumi yang Tepat

Pada tahap ini dilakukan pendefinisian model bumi (*crustal model*) lokasi penelitian yang terdiri dari kedalaman, kecepatan gelombang-P, kecepatan gelombang-S, densitas, W_p dan Q_s . Tahapan ini memegang peranan penting sebagai langkah awal karena jika pendefinisian *crustal model* kurang tepat akan berpengaruh pada proses selanjutnya. Oleh karena itu pastikan jika *crustal model* yang digunakan benar.



Gambar 3.3 Model Bumi



Gambar 3.4 Hasil *plot* Model Bumi

2. Event Info

Pada tahap ini mendefinisikan mengenai parameter gempa yang terdiri dari *latitude*, *longitude*, kedalaman, magnitudo dan waktu terjadi gempa.

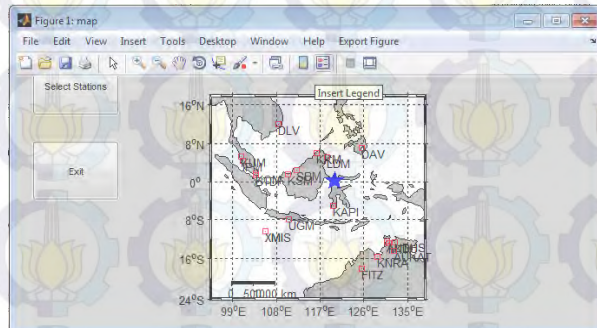
The 'eventinfo' window contains the following fields and values:

- Date (YYYYMMDD):** 20140923
- Location:**
 - Lat (Deg,Min):** 38.00 50.00
 - Lat (N) (Dec.Degrees):** 0.1073
 - Depth (km):** 96.2
 - Lon (Deg,Min):** 21.00 50.00
 - Lon (E) (Dec.Degrees):** 119.9809
- Origin Time:**
 - Hour:** 10
 - Min:** 22
 - Seconds:** 20.00
- Comments:** Magnitude: 5.3
- Location agency:** IRIS
- Time Window Length (sec):** A list of values including 16.384, 40.96, 81.92, 163.84, 327.68, 409.6, 819.2, and 1638.4. The value 163.84 is selected.
- Automatic form fill:** e.g. 20100118 1556 8.38 38 25.19 21E55.44 6.29 -5.23
- Buttons:** Save, Exit, Read

Gambar 3.5 Tampilan pada tahap penentuan *event info*

3. Station Selection

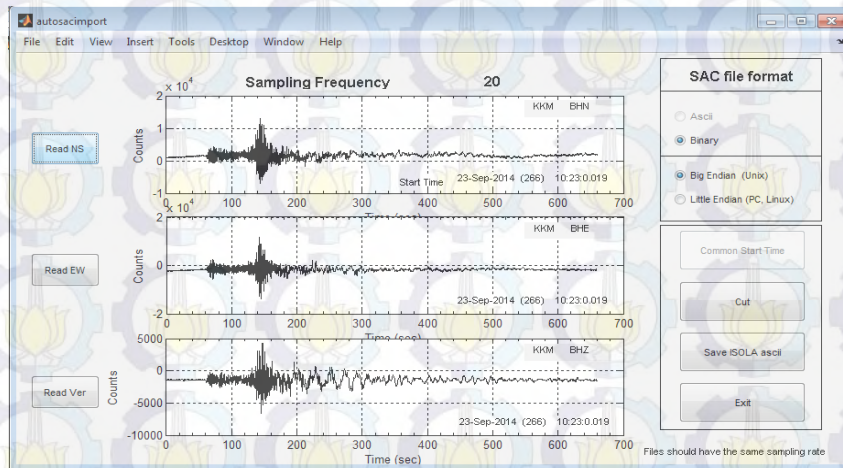
Pada tahap ini ditentukan atau dipilih stasiun yang ingin digunakan dalam perhitungan. Untuk program ISOLA minimal digunakan 3 stasiun untuk keperluan keakuratan hasil yang didapat.



Gambar 3.6 Tampilan pada Tahap Pemilihan Stasiun

4. SAC Import

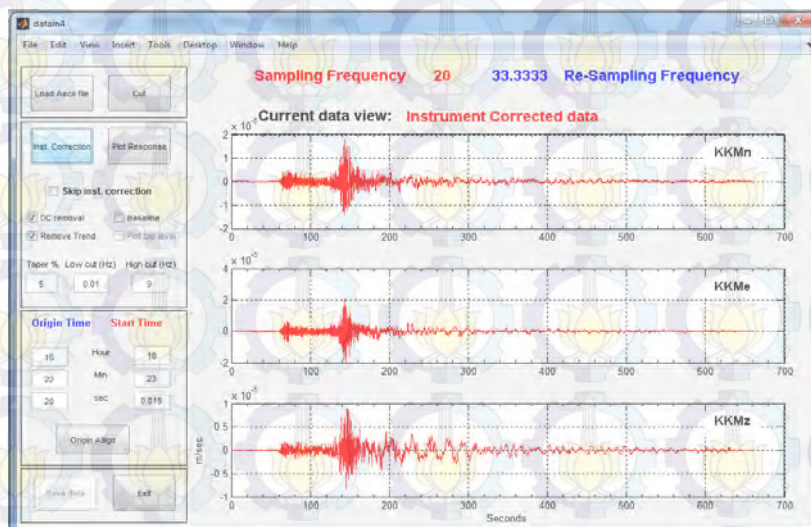
Pada tahap SAC import data gempa dari stasiun yang sudah dipilih diinput ke dalam program ISOLA. Pada tahap ini data akan dikonversi oleh program dari format SAC ke format ASCII.



Gambar 3.7 Tampilan pada SAC *Import*

5. Raw Data Preparation

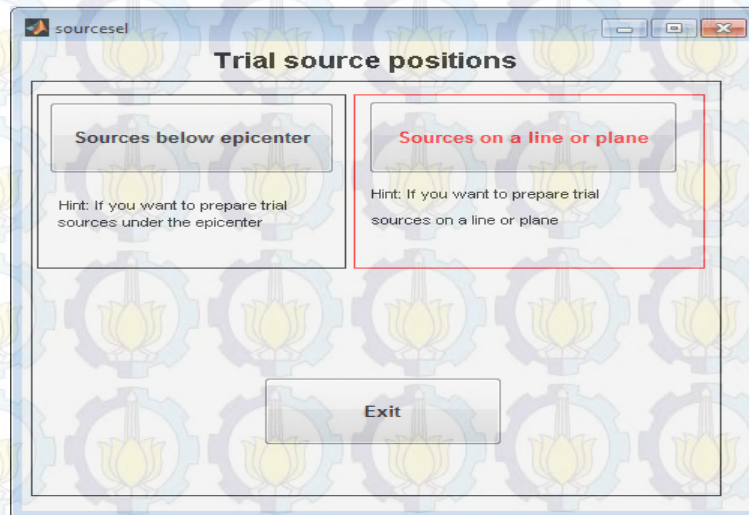
Pada tahap ini dilakukan persiapan data gempa yang digunakan. Tahapan ini bisa dikatakan adalah tahap yang terpenting dari serangkaian proses. Karena pada tahap dilakukan pengolahan yang melibatkan seismogram terdiri dari melakukan pengkoreksian instrument, *origin time*, *alignment*, dan *resampling*, melakukan *filter* dengan memilih frekuensi rendah dan tinggi untuk meminimalkan *noise* dan menyiapkan data untuk proses inversi.



Gambar 3.8 Tampilan pada Tahap *Raw Data Preparation*

6. Penentuan Lokasi Sumber Seismik

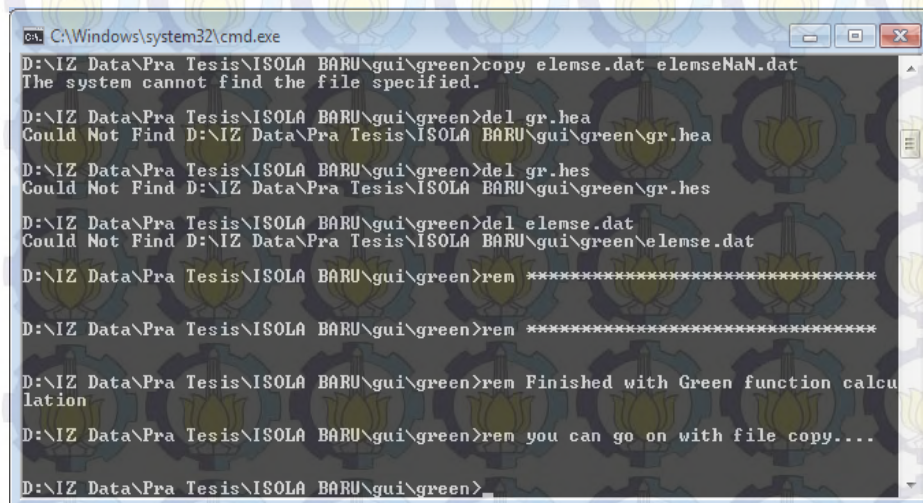
Tahap pendefinisian sumber seismik dilakukan dengan menentukan awal kedalaman, *range* kedalaman dan jumlah sumber seismik yang akan digunakan untuk proses inversi.



Gambar 3.9 Tampilan pada Tahap Penentuan Lokasi Sumber Seismik

7. Green Function Computation

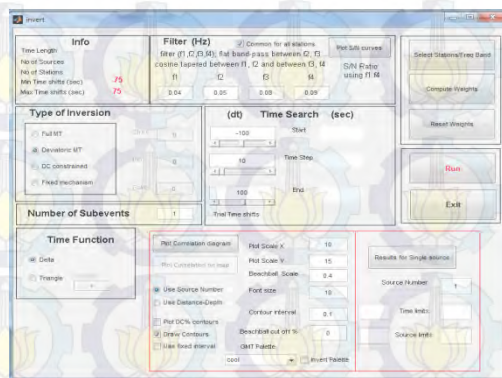
Pada tahap ini dilakukan perhitungan fungsi green untuk mendapatkan besarnya momen tensor dan parameter sumber gempa yang lain.



Gambar 3.10 Tampilan pada Perhitungan Fungsi Gree

8. Inversion

Setelah dilakukan perhitungan fungsi green langkah selanjutnya melakukan inversi. Proses inversi data *waveform* tiga komponen dilakukan dengan metode iterasi dekonvolusi. Pada tahap ini dilakukan pemilihan frekuensi untuk *filter* yang disesuaikan dengan *filter* yang cocok untuk lokasi penelitian. Parameter-parameter sumber gempa bumi diestimasi dengan menggunakan model inversi untuk mencapai *fitting waveform* 3 komponen dengan baik. Proses inversi yang baik didasarkan hasil pencocokan data observasi dan data sintetis yang dihasilkan dalam proses inversi. Hasil yang baik terjadi jika data observasi dan data sintetis saling tumpang tindih.



Gambar 3.11 Tampilan Perhitungan Inversi *Waveform*

9. Plot Result

Pada tahap ini perhitungan fungsi Green ditampilkan dalam bentuk gambar momen tensornya disertai dengan informasi parameter sumber gempa. Untuk melihat kesesuaian hasil dengan kondisi sebenarnya terlihat dari nilai *varr reduction* dimana jika *varr reduction* $> 0,5$ maka dikatakan hasil yang didapatkan sesuai karena memiliki ketelitian yang besar yakni $>50\%$. Dan untuk hasil proses inversi ditampilkan hasil *fitting* antara data observasi dan data sintetis. Hasil *fitting* yang baik adalah mendekati nilai 1 artinya antara data observasi dan data sintetis cocok 100%.

3.4 Perhitungan Data

Setelah didapat hasil inversi solusi momen tensor. Kemudian dilakukan perhitungan panjang, lebar, luas sesar dan besarnya *displacement / slip* gempa.

3.4.1 Perhitungan Dimensi Sesar

Perhitungan dimensi sesar disesuaikan berdasarkan pola sesar yang ditunjukkan oleh *beach ball* dari hasil inversi. Adapun perhitungan besar dimensi sesar yang digunakan adalah:

1. Sesar *Strike Slip*

$$\text{Log } L = 0.59 M_w - 2.30 \dots\dots\dots(3.1)$$

$$\text{Log } A = 0.82 M_w - 2.79 \dots\dots\dots(3.2)$$

$$\text{Log } W = 0.23 M_w - 0.49 \dots\dots\dots(3.3)$$

2. Sesar *Dip Slip* di *Continental*

$$\text{Log } L = 0.50 M_w - 1.86 \dots\dots\dots(3.4)$$

$$\text{Log } A = 0.78 M_w - 2.56 \dots\dots\dots(3.5)$$

$$\text{Log } W = 0.28 M_w - 0.70 \dots\dots\dots(3.6)$$

3. Sesar *Dip Slip* di Zona Subduksi

$$\text{Log } L = 0.55 M_w - 2.19 \dots\dots\dots(3.7)$$

$$\text{Log } A = 0.86 M_w - 2.82 \dots\dots\dots(3.8)$$

$$\text{Log } W = 0.31 M_w - 0.63 \dots\dots\dots(3.9)$$

Dimana:

L = panjang sesar (km)

A = luas sesar (km²)

W = lebar sesar (km)

(Papazachos.et.al, 2004)

3.4.2 Perhitungan *Displacement* / *Slip* Gempa

Perhitungan *slip* gempa dilakukan dengan menggunakan hubungan *displacement* dengan momen seismik gempa. yaitu dengan menggunakan persamaan:

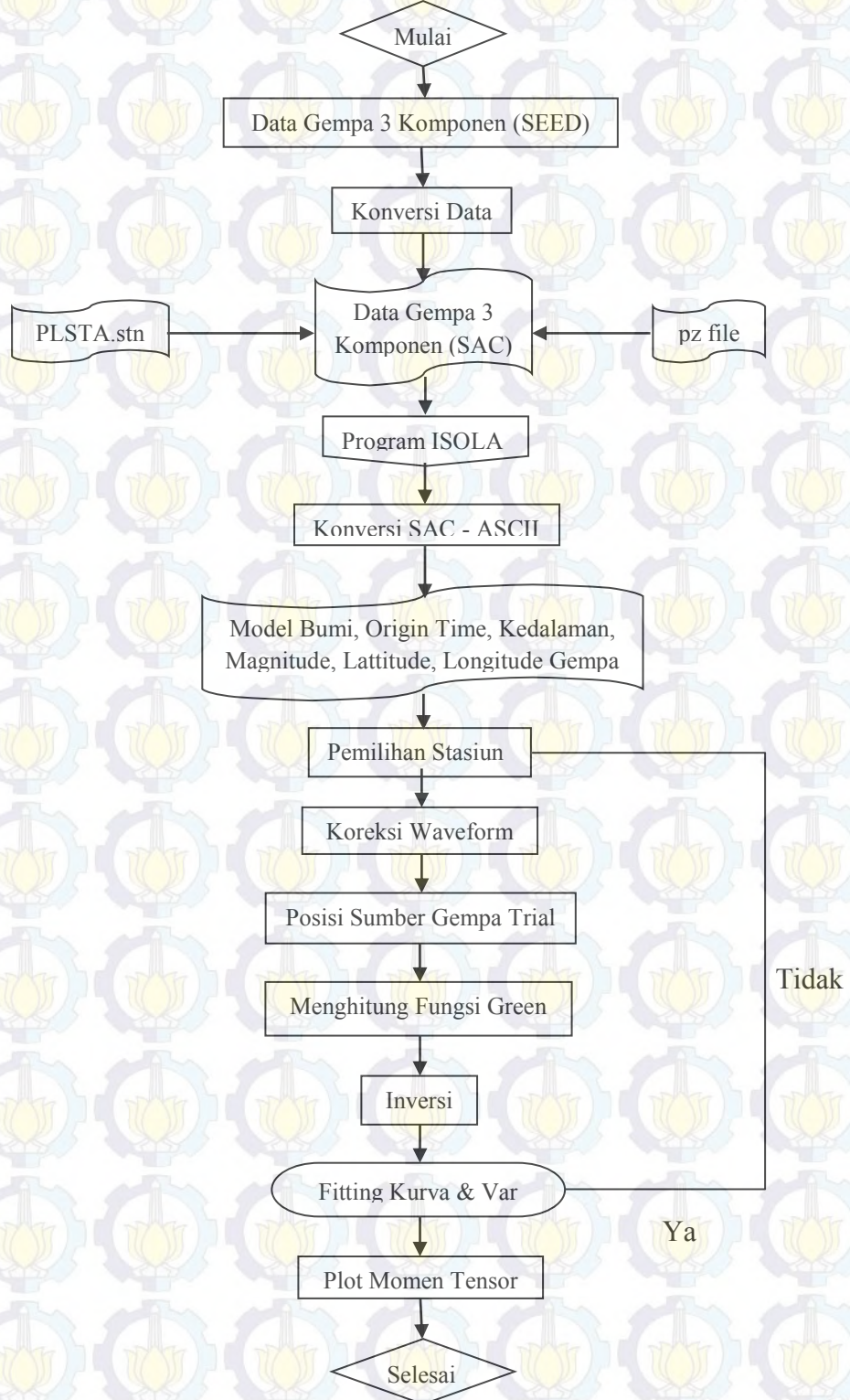
$$M_o = \mu . A . D \dots\dots\dots (3.10)$$

Sehingga besarnya *slip* yang menyebabkan gempa dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$D = \frac{M_o}{\mu . A} \dots\dots\dots (3.11)$$

(Madlazim, 2011)

3.5 Flowchart Penelitian



Gambar 3.12 Flowchart Tahapan Penelitian

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data

4.1.1 Data Penelitian

Dalam penelitian ini telah dilakukan analisis mekanisme fokus gempa bumi Sulawesi Utara yang terjadi di pesisir utara, timur, dan selatan. Gempa-gempa ini memiliki kekuatan ≥ 5 SR. Pada penelitian ini digunakan data gempa bumi tahun 2014. Adapun data dan parameter gempa yang digunakan seperti dibawah ini :

Tabel 4.1 Data *Event* Gempa Bumi Sulawesi Utara Tahun 2014

No	Tanggal	Waktu	Lat	Long	Mag	Depth	Lokasi
1	20140223	15:06:52	-1,04	120,26	5,3	18,0	Palu Sulawesi
2	20140322	20:46:53	3,60	127,08	5,0	68,0	Talaud Islands
3	20140504	08:53:58	4,28	126,72	5,0	93,0	Talaud Islands
4	20140529	01:16:50	-0,13	125,30	5,1	38,0	Southern Molucca
5	20140910	02:46:10	-0,18	125,09	6,2	54,0	Southern Molucca
6	20140910	05:16:57	-0,34	125,11	5,8	76,0	Southern Molucca
7	20140926	18:29:12	3,99	126,78	5,0	56,0	Talaud Islands
8	20141115	02:31:43	1,98	126,48	7,0	53,0	Northern Molucca
9	20141115	03:08:05	-0,23	124,07	6,3	104,0	Southern Molucca
10	20141118	04:47:21	1,94	126,40	5,6	59,0	Northern Molucca

Stasiun yang dipilih adalah stasiun terdekat sebagaimana diperlihatkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Stasiun yang Merekam *Event* Gempa Bumi Sulawesi Utara Tahun 2014

No	Network	Station	Latitude	Longitude
1	IA	MPS	0,34	119,90
2	GE	TOL	1,12	120,79
3	IA	APS	-0,91	121,65
4	IA	MRS	0,48	121,94
5	GE	LUW	-1,04	122,77
6	IA	TMS	1,29	124,92
7	IA	LBM	-0,64	127,50
8	IA	GLM	1,84	127,79

4.2 Hasil Pengolahan

4.2.1 Hasil Momen Skalar

Dari hasil pengolahan menggunakan program ISOLA-GUI didapatkan besarnya momen skalar (M_0) atau momen seismik merupakan solusi yang menggambarkan besarnya energi yang dilepaskan oleh sumber gempa bumi. Secara teori matematis momen seismik sebanding dengan modulus geser (μ), *slip* antara kedua sesar (D), dan luas bidang sesar (A) (Madlazim, 2011). Adapun hasil perhitungan yang didapatkan adalah sebagai berikut :

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Momen Skalar Gempa Sulawesi Utara Tahun 2014

No	Tanggal	Jam	Mag	Momen Skalar (Nm)	
				ISOLA	Global CMT
1	20140223	15:06:52	5,3	$5,520 \times 10^{16}$	$15,60 \times 10^{16}$
2	20140322	20:46:53	5,0	$2,850 \times 10^{16}$	$10,40 \times 10^{16}$
3	20140504	08:53:58	5,0	$3,881 \times 10^{16}$	$7,150 \times 10^{16}$
4	20140529	01:16:50	5,1	$2,827 \times 10^{16}$	$7,510 \times 10^{16}$
5	20140910	02:46:10	6,2	$1,723 \times 10^{18}$	$3,230 \times 10^{18}$
6	20140910	05:16:57	5,8	$3,337 \times 10^{17}$	$8,630 \times 10^{17}$
7	20140926	18:29:12	5,0	$2,141 \times 10^{16}$	$5,350 \times 10^{16}$

8	20141115	02:31:43	7,0	$8,725 \times 10^{18}$	$47,50 \times 10^{18}$
9	20141115	03:08:05	6,3	$4,186 \times 10^{17}$	$9,680 \times 10^{17}$
10	20141118	04:47:21	5,6	$5,092 \times 10^{17}$	$5,660 \times 10^{17}$

Pada Tabel diatas telah disajikan hasil perhitungan dari momen skalar. Momen skalar terbesar terdapat pada *event* gempa tanggal 15-11-2014 waktu 02:31:43 dengan magnitudo gempa 7,0 SR yaitu $8,725 \times 10^{18}$ Nm, sedangkan momen skalar terkecil terdapat pada *event* gempa tanggal tanggal 26-09-2014 waktu 18:29:12 dengan magnitudo gempa 5,0 SR yaitu $2,141 \times 10^{16}$ Nm. Momen magnitudo atau lebih dikenal dengan magnitudo merupakan parameter yang memberi gambaran seberapa besar kekuatan suatu gempa. Magnitudo mempunyai hubungan dengan momen skalar yaitu sebanding dengan logaritmik dari M_0 . Sehingga bisa dipastikan jika M_0 semakin besar maka M_w juga akan semakin besar. Selain itu M_0 juga mempengaruhi besarnya *slip* dan luas bidang sesar. Semakin besar M_0 , *slip* dan luas bidang searnya semakin besar pula.

Hasil perhitungan momen skalar dengan menggunakan program *ISOLA-GUI* (yang dilakukan peneliti) kemudian dibandingkan dengan momen skalar hasil *CMT Global*. Bisa dilihat pada tabel 4.4, hasil momen skalarnya tidak jauh berbeda. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel dibawah ini :

Tabel 4.4 Perbandingan Hasil Perhitungan Momen Skalar Data Gempa Sulawesi Utara Tahun 2014

No	Momen Skalar (Nm)		Δ
	ISOLA	Global CMT	
1	$5,520 \times 10^{16}$	$15,60 \times 10^{16}$	$10,08 \times 10^{16}$
2	$2,850 \times 10^{16}$	$10,40 \times 10^{16}$	$7,550 \times 10^{16}$
3	$3,881 \times 10^{16}$	$7,150 \times 10^{16}$	$7,149 \times 10^{16}$
4	$2,827 \times 10^{16}$	$7,510 \times 10^{16}$	$7,509 \times 10^{16}$
5	$1,723 \times 10^{18}$	$3,230 \times 10^{18}$	$3,229 \times 10^{18}$
6	$3,337 \times 10^{17}$	$8,630 \times 10^{17}$	$8,629 \times 10^{17}$

7	$2,141 \times 10^{16}$	$5,350 \times 10^{16}$	$5,349 \times 10^{18}$
8	$8,725 \times 10^{18}$	$47,50 \times 10^{18}$	$38,78 \times 10^{18}$
9	$4,186 \times 10^{17}$	$9,680 \times 10^{17}$	$9,679 \times 10^{17}$
10	$5,092 \times 10^{17}$	$5,660 \times 10^{17}$	$5,659 \times 10^{17}$

4.2.2 Hasil Momen Tensor

Model gerak sesar dan karakter sesar penyebab gempa bumi dapat diketahui berdasarkan momen tensor gempa bumi. Momen tensor ini digunakan untuk menggambarkan arah gaya penyebab gempa bumi (Setyowidodo dan Santosa, 2011). Pemodelan momen tensor pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode inversi yang memanfaatkan *waveform* ataupun waktu tiba gelombang P (Kayal, 2008; Sokos dan Zahradnick, 2008).

Momen tensor menggambarkan besar dan arah gaya penyebab gempa bumi dalam enam derajat kebebasan. Pada katalog *GMT (Global Momen Tensor)* solusi momen tensor tersedia dalam koordinat bola yaitu r , t (θ), dan p (Φ). Momen tensor pada umumnya ditulis dengan M_{rt} yang berarti mempunyai arti komponen gaya yang bergerak ke arah sumbu r dan bekerja pada bidang normal terhadap sumbu t . Adapun hasil perhitungan momen tensor yang didapatkan adalah sebagai berikut :

Tabel 4.5 Momen Tensor Gempa Sulawesi Utara Tahun 2014

<i>Event</i>	$M_{rr}=$ M_{33}	$M_{tt}=$ M_{11}	$M_{pp}=$ M_{22}	$M_{rt}=$ M_{31}	$M_{rp}=$ M_{32}	$M_{tp}=$ M_{12}	Exp	Var
14_15: 06:52	5,356	-4,441	-0,915	-1,183	0,400	2,072	16	0,62
14_20: 46:53	-0,301	1,095	-0,795	0,524	2,519	0,735	16	0,61
14_08: 53:58	2,809	1,097	-3,906	-0,981	-1,232	-0,636	16	0,64
14_01:	1,408	-2,606	1,198	0,570	-1,582	-0,253	16	0,52

16:50								
14_02: 46:10	-0,321	-1,112	1,433	0,596	-0,835	-0,467	18	0,57
14_05: 16:57	1,391	-2,449	1,058	0,168	-2,524	0,458	17	0,65
14_18: 29:12	-0,580	1,037	-0,458	-1,017	1,369	0,930	16	0,67
14_02: 31:43	-2,845	-1,732	4,576	-5,103	3,476	-4,689	18	0,58
14_03: 08:05	-0,804	2,445	-1,641	0,584	1,331	3,279	17	0,57
14_04: 47:21	0,949	0,122	-1,072	1,099	-0,718	-0,185	17	0,66

4.2.3 Hasil Mekanisme Fokus Gempa

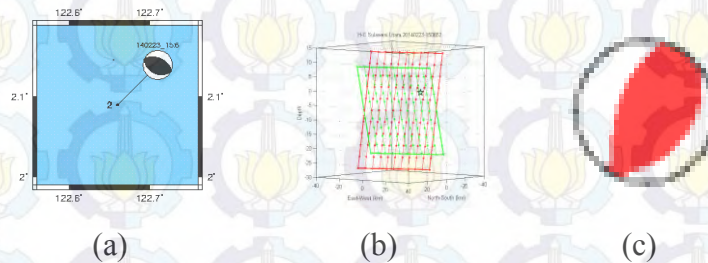
Solusi dari momen tensor gempa bumi selalu menyediakan dua bidang patahan dimana satu bidang merupakan bidang patahan (*fault plane*) dan satu bidang lainnya merupakan bidang bantu (*auxiliary plane*). Dan kedua bidang ini saling tegak lurus satu sama lain (Steith, 2003). Data yang berwarna gelap merupakan bidang patahan (Tabel 4.6).

Tabel 4.6 Bidang Sesar dan *Auxiliary Plane* Gempa Sulawesi Utara

<i>Event</i>	<i>Plane I</i>			<i>Plane II</i>		
	<i>Strike</i>	<i>Dip</i>	<i>Rake</i>	<i>Strike</i>	<i>Dip</i>	<i>Rake</i>
14_15:06:52	116	39	92	293	52	88
14_20:46:53	200	88	-115	106	25	-5
14_08:53:58	205	59	113	346	38	57
14_01:16:50	121	65	138	232	52	32
14_02:46:10	309	87	-142	217	53	-4
14_05:16:57	136	68	135	246	49	30

14_18:29:12	108	74	-45	213	47	-158
14_02:31:43	120	78	-125	13	37	-21
14_03:08:05	197	86	-158	106	68	-4
14_04:47:21	149	72	62	29	33	145

Dari hasil solusi inversi momen tensor yaitu berupa nilai *strike*, *dip*, dan *rake* digunakan untuk menganalisa bidang patahan dengan menggunakan *hc-plot*. Dari sini dapat dibedakan mana yang termasuk bidang patahan gempa yang sebenarnya. Adapun hasil didapat adalah sebagai berikut ini :

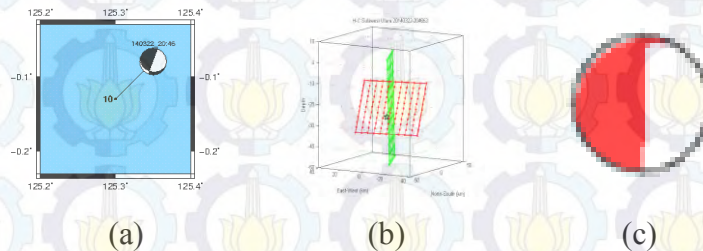


Gambar 4.1 (a). Bentuk *Beach Ball* (b). Orientasi Bidang Patahan (Hijau)
(c). Bentuk *Beach Ball Global CMT* Gempa 20140223_15:06:52

Pada gempa yang terjadi pada tanggal 23-02-2014 pada jam 15:06:52.

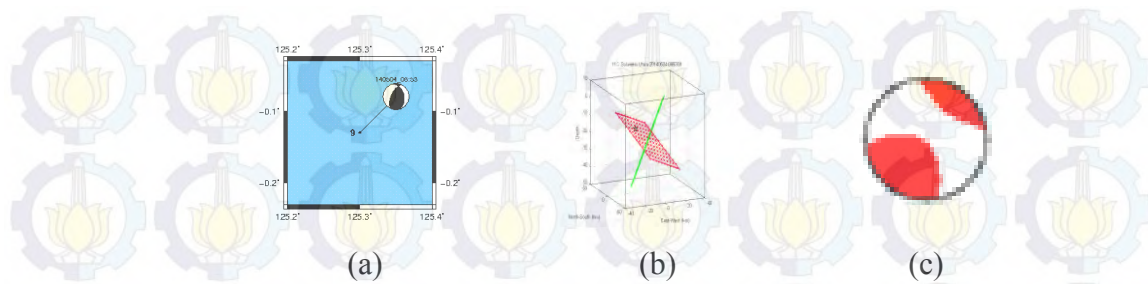
Dari hasil inversi momen tensor menunjukkan bahwa pola bidang sesar yang terbentuk adalah jenis sesar *dip slip-reverse* (Gambar 4.1). Pola sesar yang terbentuk memiliki kemiripan dengan beach ball Global CMT, namun orientasi berbeda, hal ini disebabkan oleh perbedaan pemakaian stasiun dalam pengolahan data. *Beach ball* yang didapatkan dari hasil perhitungan *ISOLA* mempunyai bentuk yang sama dengan *beach ball* yang dihasilkan dari *Global CMT* dengan varian reduksi 0,62. Sedangkan dari analisa *hc-plot* diketahui jarak antara hiposenter dengan bidang pertama sebesar 413,63 km sedangkan dengan bidang kedua sebesar 417,59 km, sehingga bidang patahannya yang berwarna hijau dan *auxiliary plane*-nya berwarna merah. Jika dianalisa dengan parameter sesar yang dihasilkan dari proses inversi didapat *strike* = 116, *dip* = 39, dan *rake* = 92. Hasil ini menunjukkan jika bidang patahan berada pada arah 116° dari utara (lihat

Gambar 4.1 b) yang memiliki kecuraman 39^0 dan nilai *rake* 92 (positif) bersesuaian dengan jenis sesar *dip slip-reverse* dimana patahan yang terjadi adalah patahan naik.



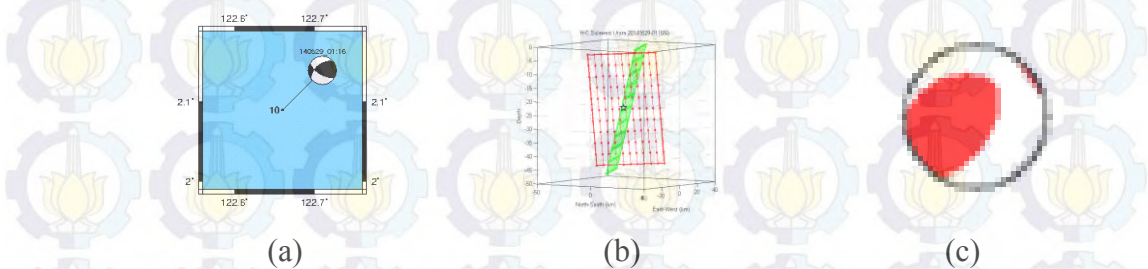
Gambar 4.2 (a). Bentuk *Beach Ball* (b). Orientasi Bidang Patahan (Hijau)
(c). Bentuk *Beach Ball Global CMT* Gempa 20140322_20:46:53

Pada gempa yang terjadi pada tanggal 22-03-2014 pada jam 20:46:53. Dari hasil inversi momen tensor menunjukkan bahwa pola bidang sesar yang terbentuk adalah jenis sesar oblique didominasi sesar *dip slip-normal* dengan sedikit sesar *strike-slip* di tenggara (Gambar 4.2). Pola sesar yang terbentuk memiliki kemiripan dengan beach ball Global CMT, namun orientasi berbeda, hal ini disebabkan oleh perbedaan pemakaian stasiun dalam pengolahan data. *Beach ball* yang didapatkan dari hasil perhitungan *ISOLA* mempunyai bentuk yang sama dengan beach ball yang dihasilkan dari Global CMT dengan varian reduksi 0,61. Sedangkan dari analisa *hc-plot* diketahui jarak antara hiposenter dengan bidang pertama sebesar 433,20 km sedangkan dengan bidang kedua sebesar 435,07 km, sehingga bidang patahannya yang berwarna hijau dan *auxiliary plane*-nya berwarna merah. Jika dianalisa dengan parameter sesar yang dihasilkan dari proses inversi didapat *strike* = 200, *dip* = 88, dan *rake* = -115. Hasil ini menunjukkan jika bidang patahan berada pada arah 200^0 dari utara (lihat Gambar 4.2 b) yang memiliki kecuraman 88^0 dan nilai *rake* -115 (negatif) bersesuaian dengan jenis sesar *dip slip-normal* dimana patahan yang terjadi adalah patahan turun dan sedikit *strike-slip* di tenggara.



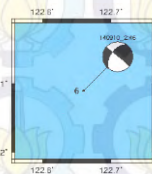
Gambar 4.3 (a). Bentuk *Beach Ball* (b). Orientasi Bidang Patahan (Merah)
(c). Bentuk *Beach Ball Global CMT* Gempa 20140504_08:53:58

Pada gempa yang terjadi pada tanggal 04-05-2014 pada jam 08:53:58. Dari hasil inversi momen tensor menunjukkan bahwa pola bidang sesar yang terbentuk adalah jenis sesar oblique didominasi sesar *dip slip-reverse* dengan sedikit sesar *strike-slip* di timur laut (Gambar 4.3). Pola sesar yang terbentuk memiliki kemiripan dengan beach ball Global CMT, namun orientasi berbeda, hal ini disebabkan oleh perbedaan pemakaian stasiun dalam pengolahan data. *Beach ball* yang didapatkan dari hasil perhitungan ISOLA mempunyai bentuk yang sama dengan *beach ball* yang dihasilkan dari *Global CMT* dengan *varian reduksi* 0,64. Sedangkan dari analisa *hc-plot* diketahui jarak antara hiposenter dengan bidang pertama sebesar 488,90 km sedangkan dengan bidang kedua sebesar 484,27 km, sehingga bidang patahannya yang berwarna merah dan *auxiliary plane*-nya berwarna hijau. Jika dianalisa dengan parameter sesar yang dihasilkan dari proses inversi didapat *strike* = 346, *dip* = 38, dan *rake* = 57. Hasil ini menunjukkan jika bidang patahan berada pada arah 346° dari utara (lihat Gambar 4.3 b) yang memiliki kecuraman 38° dan nilai *rake* 57 (positif) bersesuaian dengan jenis sesar *dip slip-reverse* dimana patahan yang terjadi adalah patahan naik dan sedikit *strike-slip* di timur laut.

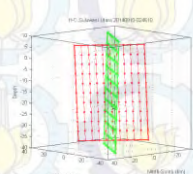


Gambar 4.4 (a). Bentuk *Beach Ball* (b). Orientasi Bidang Patahan (Hijau)
(c). Bentuk *Beach Ball Global CMT* Gempa 20140529_01:16:50

Pada gempa yang terjadi pada tanggal 29-05-2014 pada jam 01:16:50. Dari hasil inversi momen tensor menunjukkan bahwa pola bidang sesar yang terbentuk adalah jenis sesar oblique didominasi sesar *dip slip-reverse* dengan sedikit sesar *strike-slip* di barat laut (Gambar 4.4). Pola sesar yang terbentuk memiliki kemiripan dengan beach ball Global CMT, namun orientasi berbeda, hal ini disebabkan oleh perbedaan pemakaian stasiun dalam pengolahan data. *Beach ball* yang didapatkan dari hasil perhitungan ISOLA mempunyai bentuk yang sama dengan *beach ball* yang dihasilkan dari *Global CMT* dengan *varian reduksi* 0,52. Sedangkan dari analisa *hc-plot* diketahui jarak antara hiposenter dengan bidang pertama sebesar 356,69 km sedangkan dengan bidang kedua sebesar 364,83 km, sehingga bidang patahanannya yang berwarna hijau dan *auxiliary plane*-nya berwarna merah. Jika dianalisa dengan parameter sesar yang dihasilkan dari proses inversi didapat *strike* = 121, *dip* = 65, dan *rake* = 138. Hasil ini menunjukkan jika bidang patahan berada pada arah 121^0 dari utara (lihat Gambar 4.4 b) yang memiliki kecuraman 65^0 dan nilai *rake* 138 (positif) bersesuaian dengan jenis sesar *dip slip-reverse* dimana patahan yang terjadi adalah patahan naik dan sedikit *strike-slip* di barat laut.



(a)



(b)

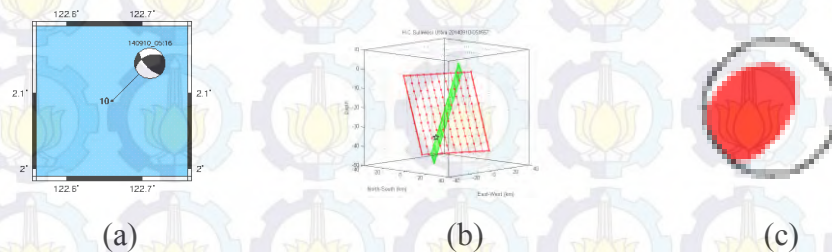


(c)

Gambar 4.5 (a). Bentuk *Beach Ball* (b). Orientasi Bidang Patahan (Hijau)
(c). Bentuk *Beach Ball Global CMT* Gempa 20140910_02:46:10

Pada gempa yang terjadi pada tanggal 10-09-2014 pada jam 02:46:10. Dari hasil inversi momen tensor menunjukkan bahwa pola bidang sesar yang terbentuk adalah jenis sesar oblique didominasi sesar *dip slip-normal* dengan sedikit sesar *strike-slip* di barat laut (Gambar 4.5). Pola sesar yang terbentuk memiliki kemiripan dengan beach ball Global CMT, namun orientasi berbeda, hal ini disebabkan oleh perbedaan pemakaian stasiun dalam pengolahan data. *Beach ball* yang didapatkan dari hasil perhitungan *ISOLA* mempunyai bentuk

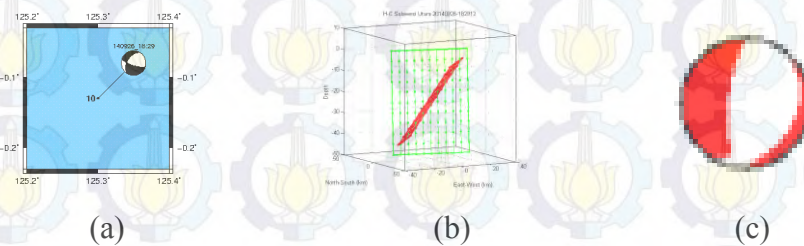
yang sama dengan *beach ball* yang dihasilkan dari *Global CMT* dengan *varian reduksi* 0,57. Sedangkan dari analisa *hc-plot* diketahui jarak antara hiposenter dengan bidang pertama sebesar 344,90 km sedangkan dengan bidang kedua sebesar 357,15 km, sehingga bidang patahannya yang berwarna hijau dan *auxiliary plane*-nya berwarna merah. Jika dianalisa dengan parameter sesar yang dihasilkan dari proses inversi didapat *strike* = 309, *dip* = 87, dan *rake* = -142. Hasil ini menunjukkan jika bidang patahan berada pada arah 309⁰ dari utara (lihat Gambar 4.5 b) yang memiliki kecuraman 87⁰ dan nilai *rake* -142 (negatif) bersesuaian dengan jenis sesar *dip slip-normal* dimana patahan yang terjadi adalah patahan turun dan sedikit *strike-slip* di barat laut.



Gambar 4.6 (a). Bentuk *Beach Ball* (b). Orientasi Bidang Patahan (Hijau)
(c). Bentuk *Beach Ball Global CMT* Gempa 20140910_05:16:57

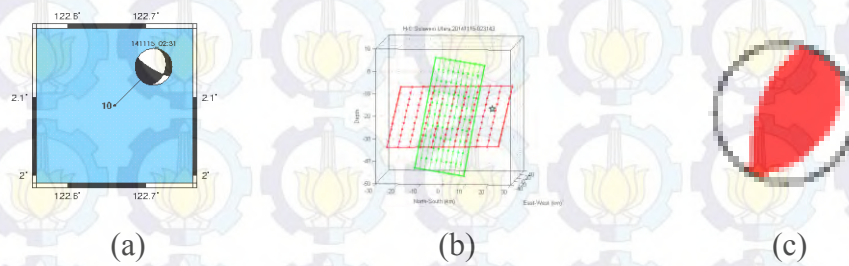
Pada gempa yang terjadi pada tanggal 10-09-2014 pada jam 05:16:57. Dari hasil inversi momen tensor menunjukkan bahwa pola bidang sesar yang terbentuk adalah jenis sesar oblique didominasi sesar *dip slip-reverse* dengan sedikit sesar *strike-slip* di barat laut (Gambar 4.6). Pola sesar yang terbentuk memiliki kemiripan dengan *beach ball Global CMT*, namun orientasi berbeda, hal ini disebabkan oleh perbedaan pemakaian stasiun dalam pengolahan data. *Beach ball* yang didapatkan dari hasil perhitungan *ISOLA* mempunyai bentuk yang sama dengan *beach ball* yang dihasilkan dari *Global CMT* dengan *varian reduksi* 0,65. Sedangkan dari analisa *hc-plot* diketahui jarak antara hiposenter dengan bidang pertama sebesar 359,45 km sedangkan dengan bidang kedua sebesar 365,96 km, sehingga bidang patahannya yang berwarna hijau dan *auxiliary plane*-nya berwarna merah. Jika dianalisa dengan parameter sesar yang dihasilkan dari proses inversi didapat *strike* = 136, *dip* = 68, dan *rake* = 135.

Hasil ini menunjukkan jika bidang patahan berada pada arah 136^0 dari utara (lihat Gambar 4.6 b) yang memiliki kecuraman 68^0 dan nilai *rake* 135 (positif) bersesuaian dengan jenis sesar *dip slip-reverse* dimana patahan yang terjadi adalah patahan naik dan sedikit *strike-slip* di barat laut.



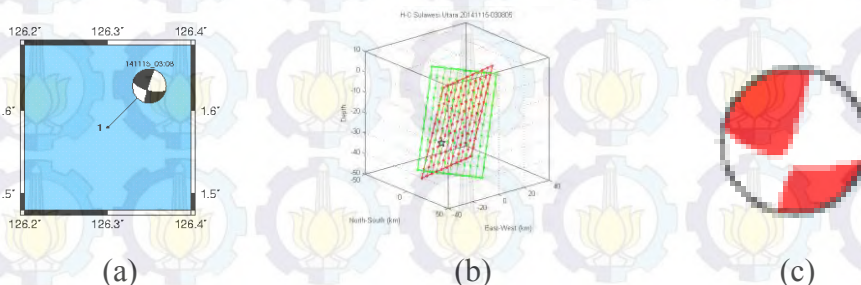
Gambar 4.7 (a). Bentuk *Beach Ball* (b). Orientasi Bidang Patahan (Merah)
(c). Bentuk *Beach Ball Global CMT* Gempa 20140926_18:29:12

Pada gempa yang terjadi pada tanggal 26-09-2014 pada jam 18:29:12. Dari hasil inversi momen tensor menunjukkan bahwa pola bidang sesar yang terbentuk adalah jenis sesar oblique didominasi sesar *dip slip-normal* dengan sedikit sesar *strike-slip* di barat laut (Gambar 4.7). Pola sesar yang terbentuk memiliki kemiripan dengan beach ball Global CMT, namun orientasi berbeda, hal ini disebabkan oleh perbedaan pemakaian stasiun dalam pengolahan data. *Beach ball* yang didapatkan dari hasil perhitungan *ISOLA* mempunyai bentuk yang sama dengan *beach ball* yang dihasilkan dari *Global CMT* dengan *varian reduksi* 0,67. Sedangkan dari analisa *hc-plot* diketahui jarak antara hiposenter dengan bidang pertama sebesar 419,40 km sedangkan dengan bidang kedua sebesar 395,87 km, sehingga bidang patahannya yang berwarna merah dan *auxiliary plane*-nya berwarna hijau. Jika dianalisa dengan parameter sesar yang dihasilkan dari proses inversi didapat *strike* = 213, *dip* = 47, dan *rake* = -158. Hasil ini menunjukkan jika bidang patahan berada pada arah 213^0 dari utara (lihat Gambar 4.7 b) yang memiliki kecuraman 47^0 dan nilai *rake* -158 (negatif) bersesuaian dengan jenis sesar *dip slip-normal* dimana patahan yang terjadi adalah patahan turun dan sedikit *strike-slip* di barat laut.



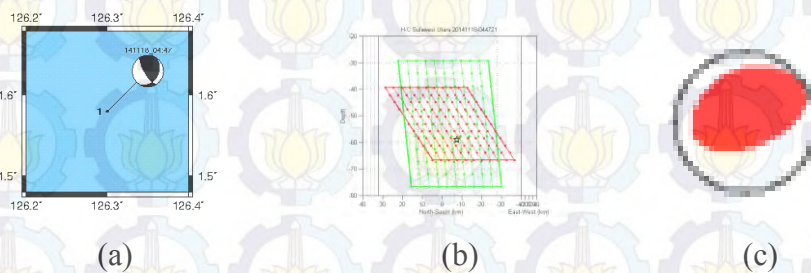
Gambar 4.8 (a). Bentuk *Beach Ball* (b). Orientasi Bidang Patahan (Merah)
(c). Bentuk *Beach Ball Global CMT* Gempa 20141115_02:31:43

Pada gempa yang terjadi pada tanggal 15-11-2014 pada jam 02:31:43. Dari hasil inversi momen tensor menunjukkan bahwa pola bidang sesar yang terbentuk adalah jenis sesar oblique didominasi sesar *dip slip-normal* dengan sedikit sesar *strike-slip* di timur laut (Gambar 4.8). Pola sesar yang terbentuk memiliki kemiripan dengan beach ball Global CMT, namun orientasi berbeda, hal ini disebabkan oleh perbedaan pemakaian stasiun dalam pengolahan data. *Beach ball* yang didapatkan dari hasil perhitungan *ISOLA* mempunyai bentuk yang sama dengan *beach ball* yang dihasilkan dari *Global CMT* dengan *varian reduksi* 0,58. Sedangkan dari analisa *hc-plot* diketahui jarak antara hiposenter dengan bidang pertama sebesar 404,25 km sedangkan dengan bidang kedua sebesar 401,43 km, sehingga bidang patahannya yang berwarna merah dan *auxiliary plane*-nya berwarna hijau. Jika dianalisa dengan parameter sesar yang dihasilkan dari proses inversi didapat *strike* = 13, *dip* = 37, dan *rake* = -21. Hasil ini menunjukkan jika bidang patahan berada pada arah 13^0 dari utara (lihat Gambar 4.8 b) yang memiliki kecuraman 37^0 dan nilai *rake* -21 (negatif) bersesuaian dengan jenis sesar *dip slip-normal* dimana patahan yang terjadi adalah patahan turun dan sedikit *strike-slip* di timur laut.



Gambar 4.9 (a). Bentuk *Beach Ball* (b). Orientasi Bidang Patahan (Merah)
(c). Bentuk *Beach Ball Global CMT* Gempa 20141115_03:08:05

Pada gempa yang terjadi pada tanggal 15-11-2014 pada jam 03:08:05. Dari hasil inversi momen tensor menunjukkan bahwa pola bidang sesar yang terbentuk adalah jenis sesar oblique didominasi sesar *dip slip-normal* dengan sedikit sesar *strike-slip* di tenggara (Gambar 4.9). Pola sesar yang terbentuk memiliki kemiripan dengan beach ball Global CMT, namun orientasi berbeda, hal ini disebabkan oleh perbedaan pemakaian stasiun dalam pengolahan data. *Beach ball* yang didapatkan dari hasil perhitungan *ISOLA* mempunyai bentuk yang sama dengan *beach ball* yang dihasilkan dari *Global CMT* dengan varian reduksi 0,57. Sedangkan dari analisa *hc-plot* diketahui jarak antara hiposenter dengan bidang pertama sebesar 291,59 km sedangkan dengan bidang kedua sebesar 282,14 km, sehingga bidang patahannya yang berwarna merah dan *auxiliary plane*-nya berwarna hijau. Jika dianalisa dengan parameter sesar yang dihasilkan dari proses inversi didapat *strike* = 106, *dip* = 68, dan *rake* = -4. Hasil ini menunjukkan jika bidang patahan berada pada arah 106^0 dari utara (lihat Gambar 4.9 b) yang memiliki kecuraman 68^0 dan nilai *rake* -4 (negatif) bersesuaian dengan jenis sesar *dip slip-normal* dimana patahan yang terjadi adalah patahan turun dan sedikit *strike-slip* di tenggara.



Gambar 4.10 (a). Bentuk *Beach Ball* (b). Orientasi Bidang Patahan (Merah)
(c). Bentuk *Beach Ball Global CMT* Gempa 20141118_04:47:21

Pada gempa yang terjadi pada tanggal 18-11-2014 pada jam 04:47:21. Dari hasil inversi momen tensor menunjukkan bahwa pola bidang sesar yang terbentuk adalah jenis sesar oblique didominasi sesar *dip slip-normal* dengan sedikit sesar *strike-slip* di tenggara (Gambar 4.10). Pola sesar yang terbentuk memiliki kemiripan dengan beach ball Global CMT, namun orientasi berbeda,

hal ini disebabkan oleh perbedaan pemakaian stasiun dalam pengolahan data. *Beach ball* yang didapatkan dari hasil perhitungan *ISOLA* mempunyai bentuk yang sama dengan *beach ball* yang dihasilkan dari *Global CMT* dengan *varian reduksi* 0,66. Sedangkan dari analisa *hc-plot* diketahui jarak antara hiposenter dengan bidang pertama sebesar 441,46 km sedangkan dengan bidang kedua sebesar 426,72 km, sehingga bidang patahannya yang berwarna merah dan *auxiliary plane*-nya berwarna hijau. Jika dianalisa dengan parameter sesar yang dihasilkan dari proses inversi didapat *strike* = 77, *dip* = 55, dan *rake* = -106. Hasil ini menunjukkan jika bidang patahan berada pada arah 77° dari utara (lihat Gambar 4.10 b) yang memiliki kecuraman 55° dan nilai *rake* -106 (negatif) bersesuaian dengan jenis sesar *dip slip-normal* dimana patahan yang terjadi adalah patahan turun dan sedikit *strike-slip* di tenggara.

4.2.4 Hasil *Slip* Sesar Gempa

Dari besar magnitudo *event* gempa yang ada di Sulawesi Utara didapatkan besar *slip* untuk masing-masing *event* gempa. Besarnya *slip* merepresentasikan dislokasi atau pergeseran bidang patahan yang terjadi selama gempa bumi berlangsung. Adapun besarnya *slip* adalah sebagai berikut :

Tabel 4.7 Besar *Slip* Sesar Gempa Bumi Sulawesi Utara Tahun 2014

No	Origin Time	Mw (SR)	Kedalaman Gempa (km)	L (km)	W (km)	A (km ²)	S (cm)
1	14_15:06:52	5,3	18,0	5,309	10,304	54,702	3,20
2	14_20:46:53	5,0	68,0	3,631	8,318	30,199	1,39
3	14_08:53:58	5,0	93,0	3,631	8,318	30,199	1,86
4	14_01:16:50	5,1	38,0	4,121	8,933	36,813	1,17
5	14_02:46:10	6,2	54,0	16,596	19,588	325,087	7,83
6	14_05:16:57	5,8	76,0	10,000	14,723	147,231	3,29
7	14_18:29:12	5,0	56,0	3,631	8,318	30,199	1,05
8	14_02:31:43	7,0	53,0	45,709	34,674	1584,893	8,14
9	14_03:08:05	6,3	104,0	18,836	21,038	396,278	1,53
10	14_04:47:21	5,6	59,0	7,762	12,764	99,083	7,59

4.3 Pembahasan

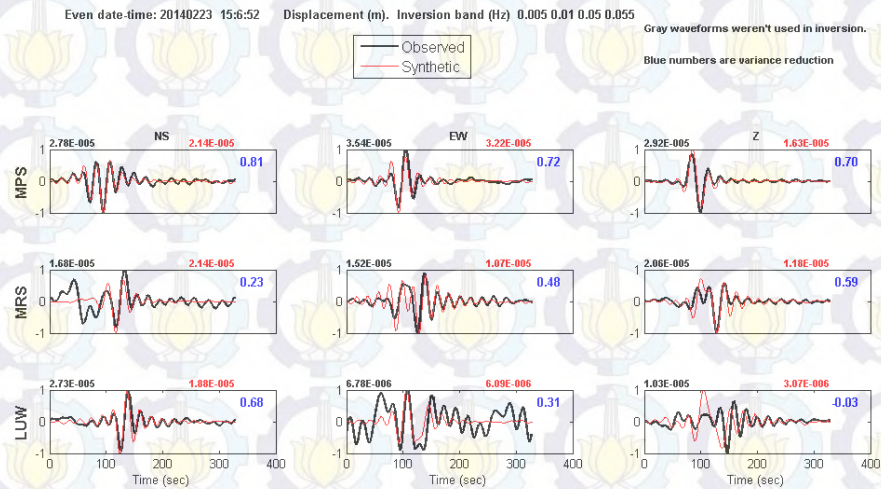
Dalam penelitian ini telah dilakukan analisa mengenai gempa bumi Sulawesi Utara. Pada penelitian ini digunakan data gempa bumi tahun 2014. Dari data gempa inilah kemudian digunakan untuk mendapatkan besarnya momen tensor gempa.

4.3.1 Momen Tensor

Momen tensor digunakan untuk menggambarkan arah gaya penyebab gempa bumi. Ketika suatu gempa bumi terjadi, gelombang seismik itu disebarkan dari hiposenter yang akan membawa banyak informasi dari mekanisme sumber gempa bumi. Dari gelombang seismik kita dapat menaksir suatu retakan yang mendadak berlangsung sepanjang sesar. Solusi dari momen tensor pada umumnya digambarkan dengan *beach ball*, dari sini dapat diketahui jenis sesar penyebab gempa bumi. Untuk mendapatkan solusi momen tensor dari gempa bumi yang terjadi digunakan analisa *waveform* tiga komponen (NS, EW, dan vertikal). Parameter-parameter sumber gempa bumi yang belum diketahui, diestimasi dengan menggunakan model inversi. Proses inversi dilakukan dengan menggunakan metode iterasi *dekonvolusi* untuk mencapai fitting *waveform* tiga komponen dengan baik. Proses inversi yang baik didasarkan pada hasil pencocokan data seismogram dan data sintetik dari hasil inversi. Hasil yang baik terjadi saat data observasi dan data sintetik saling tumpang tindih.

Data seismogram sintetik didapatkan dari hasil perhitungan menggunakan fungsi *Green* yang kemudian dilakukan proses inversi untuk dibandingkan dengan data seismogram observasi (dapat dilihat pada Gambar 4.11). Gambar tersebut merupakan hasil dari proses inversi data seismogram dan data sintetik. Kurva warna merah adalah kurva hasil estimasi menggunakan fungsi *Green* sedangkan kurva hitam merupakan kurva data seismogram. Bisa dilihat kurva hitam dan kurva merah saling tumpang tindih dengan nilai korelasi diantara keduanya 0,68-0,81 (pojok kanan atas). Korelasi ini terbilang baik jika dilihat dari *fitting* kurva. Korelasi antara data seismogram dan sintetik semakin baik jika

mendekati nilai 1. Ini berarti antara data seismogram dan sintetik memiliki kecocokan yang sangat baik.

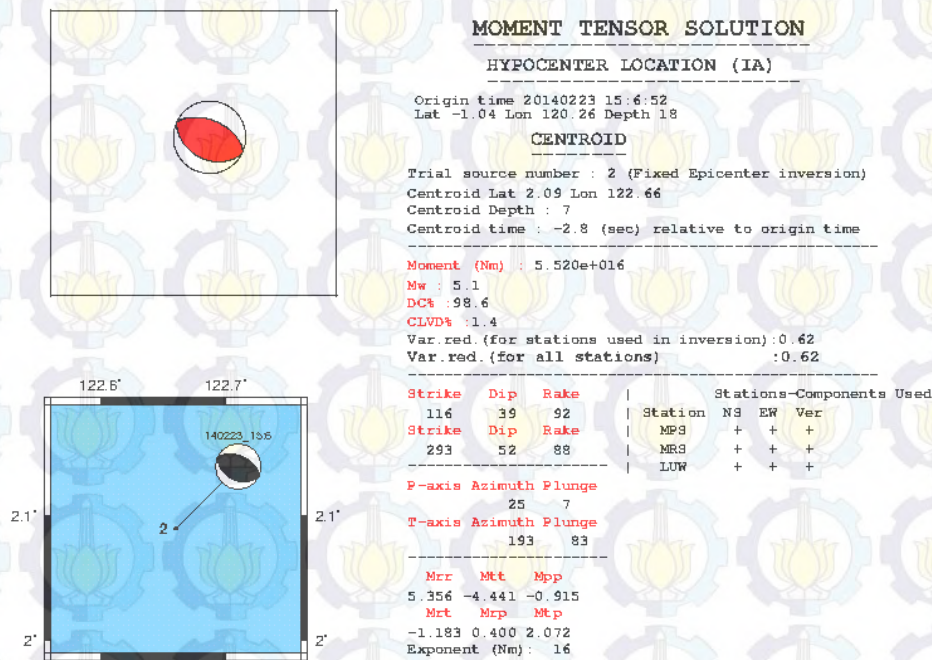


Gambar 4.11 Hasil Inversi *Waveform* Antara Data Sintetik dan Data Observasi Gempa Bumi Sulawesi Utara pada Tanggal 23-02-2014 Waktu 15:06:52

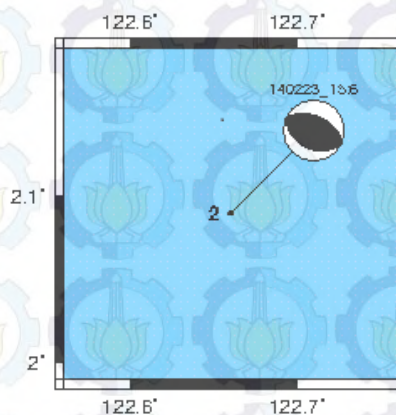
Dari hasil inversi momen tensor didapatkan hasil *beach ball* seperti Gambar 4.12. Dari hasil inversi gempa pada 23-02-2014 waktu 15:06:52 didapatkan letak *centroid momen tensor* (CMT) dari gempa berada pada kedalaman 7 km berjarak 11 km dari hiposenter gempa. CMT terjadi setelah 2,8 sekon terjadinya gempa di hiposenter. Prosentase *DC* menggambarkan sesar yang menyebabkan terjadinya gempa bumi adalah system *double couple* yaitu kopel ganda jika nilai DC lebih dari 75%. Sehingga ini berarti sesar yang menyebabkan gempa bumi adalah tipe sesar geser dengan medium *isotropic* (Madlazim, 2011). Prosentase *double couple* (dc) yang dihasilkan adalah 98,6%. Berarti sesar yang menyebabkan gempa bumi adalah sesar geser dengan dominasi *reverse dip slip*. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan sebelumnya jika berdasarkan solusi momen tensor yang didapatkan gempa bumi Sulawesi Utara disebabkan *double couple*.

Sedangkan untuk besar dan arah momen tensor disediakan dalam koordinat bola yaitu r , t (theta), dan p (phi). Didapatkan $M_{rr} = M_{zz} = 5,356 \times 10^{16}$ Nm, $M_{tt} = M_{xx} = -4,441 \times 10^{16}$ Nm, $M_{pp} = M_{yy} = -0,915 \times 10^{16}$ Nm, $M_{rt} = M_{xz} = -$

$1,183 \times 10^{16}$ Nm, $M_{rp} = M_{yz} = 0,400 \times 10^{16}$ Nm, dan $M_{tp} = -M_{xy} = 2,072 \times 10^{16}$ Nm. Momen tensor menggambarkan besar dan arah gaya yang bekerja pada pusat sumber gempa bumi. Dari hasil yang didapatkan bisa dilihat jika gaya terbesar ada pada arah r atau arah z yang bersesuaian dengan arah atas.



Gambar 4.12 Hasil Solusi Momen Tensor Gempa Bumi Sulawesi Utara pada Tanggal 23-02-2014 Waktu 15:06:52



Gambar 4.13 Mekanisme Fokus Gempa. Warna Hitam Merepresentasikan Daerah Kompresi dan Warna Putih Merepresentasikan Daerah Dilatasi.

Parameter kualitas hasil inversi yang didapatkan dilihat dari hasil *fitting* gelombang tiap seismogram dan nilai varian reduksi (VR). Secara matematis perhitungan VR melibatkan *waveform* sintetik dan *waveform* seismogram. Sehingga dalam penentuan hasil yang didapat diperhitungkan antara nilai VR dan *fitting* kurjanya dimana satu sama lain tidak berdiri sendiri. Semakin tinggi nilai VR maka semakin tinggi pula tingkat korelasinya (Countant, 1989). Dan dari hasil inversi momen tensor didapat VR 0,62 atau 62%. Sehingga kualitas dari inversi sudah terbilang memenuhi syarat kevalidan.

Hasil inversi momen tensor juga menghasilkan nilai *strike*, *dip*, dan *rake* untuk dua nodal. Satu nodal merupakan bidang patahan dimana hiposenter terletak di bidang tersebut dan yang lain adalah *auxiliary plane* (bidang bantu) yang saling tegak lurus satu sama lain. *Strike* adalah sudut yang menyatakan arah lintasan garis sesar dipermukaan yang diukur dari arah utara. *Dip* menyatakan sudut kemiringan sesar diukur dari permukaan bumi. Sedangkan *rake* adalah sudut yang menggambarkan arah pergerakan *slip*.

Hasil penelitian ini mempunyai beberapa kelebihan jika dibandingkan dengan hasil solusi momen tensor dari Global CMT. Dalam pengolahan dengan menggunakan ISOLA melibatkan 3 komponen seismogram sekaligus dari gelombang-P maupun gelombang-S. Metode inversi dengan menggunakan *waveform* tiga komponen memiliki keunggulan jika dibandingkan dengan menggunakan data waktu tempuh, karena dalam metode ini waktu *origin* dan kedalaman *centroid* terkait erat satu sama lain.

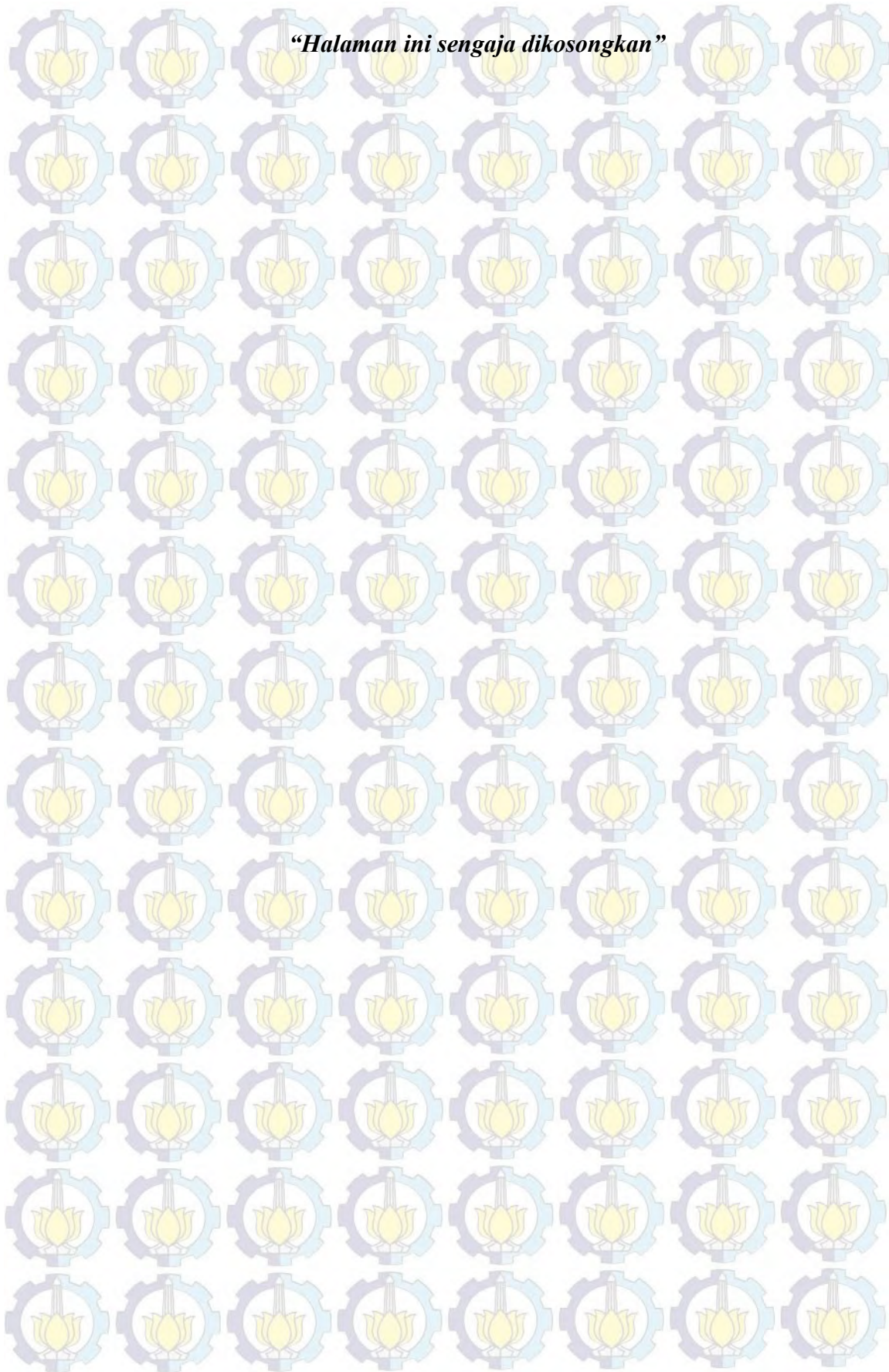
4.3.2 Mekanisme Fokus Gempa

Mekanisme fokus direpresentasikan dengan menggunakan *beach ball*. Dari hasil inversi didapatkan pola sesar pada gempa bumi Sulawesi adalah *dip slip normal*, *dip slip reverse*. Bentuk sesar ini sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi Sulawesi. Sulawesi didominasi oleh zona subduksi yang disebabkan oleh batas lempeng konvergen. Gempa-gempa Sulawesi Utara sendiri merupakan gempa bumi yang disebabkan karena penunjaman lempeng laut Maluku di bawah busur Kepulauan Sulawesi dan di bawah pulau Halmahera di sebelah timur dan

penekanan lempengan laut Sulawesi ke bawah busur Kepulauan Sulawesi Utara di sebelah utara.

Dari hasil inversi diketahui jika pola sesar pada gempa bumi Sulawesi Utara didominasi oleh sesar naik (*reverse fault*). Pola sesar naik mengindikasikan adanya interaksi antara lempeng tektonik. Hal ini bersesuaian dengan lokasi gempa yang ada pada zona subduksi. Pola sesar naik disebabkan oleh lempeng Pasifik yang bergerak ke arah barat mensubduksi daratan Sulawesi. Hal ini terlihat dari bentuk *beach ball* yang didapatkan. Dimana zona dilatasi (putih) menekan zona kompresi mengarah pada arah barat. Selain itu pembentukan pola sesar naik juga dipengaruhi oleh pergerakan lempeng Eurasia yang bergerak ke arah selatan-tenggara mensubduksi daratan Sulawesi. Hal ini juga diperkuat dengan penelitian sebelumnya juga dinyatakan jika gempa bumi Sulawesi Utara disebabkan oleh sesar naik disekitar *North Sulawesi Trench/Minahasa trench* dan *Molucca Sea Collision* (Pasau dan Tanauma, 2011).

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan


Dari penelitian yang telah dilakukan dengan menganalisa gempa bumi Sulawesi Utara didapat kesimpulan sebagai berikut :

1. *Centroid Momen Tensor (CMT)* gempa bumi ditentukan dengan menggunakan metode inversi *waveform* tiga komponen menggunakan metode iterasi *dekonvolusi*
2. Besar momen tensor untuk masing-masing komponennya dari gempa bumi Sulawesi Utara tahun 2014 mempunyai rentang sebagai berikut :
 $M_{rr} = 0,301 \text{ exp } 16 \text{ sampai } 2,845 \text{ exp } 18$
 $M_{tt} = 1,037 \text{ exp } 16 \text{ sampai } 1,732 \text{ exp } 18$
 $M_{pp} = 0,458 \text{ exp } 16 \text{ sampai } 4,576 \text{ exp } 18$
 $M_{rt} = 0,524 \text{ exp } 16 \text{ sampai } 5,103 \text{ exp } 18$
 $M_{rp} = 0,400 \text{ exp } 16 \text{ sampai } 3,476 \text{ exp } 18$
 $M_{tp} = 0,253 \text{ exp } 16 \text{ sampai } 4,689 \text{ exp } 18$
3. Pola bidang sesar gempa yang terjadi adalah dominasi sesar naik (*reverse fault*) dan *oblique* dengan sudut *dip* yang bervariasi.
4. Besar *slip* rata-rata dari *event* gempa bumi Sulawesi Utara adalah 8,14 cm

5.2 Saran

Adapun saran yang diberikan penulis dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengingat banyaknya *event* gempa bumi yang terjadi di Sulawesi Utara, maka perlu terus dilakukan penelitian gempa bumi pada *event-event* yang lain
2. Untuk mendapatkan hasil fitting yang baik, diperlukan studi lebih lanjut tentang model bumi di daerah Sulawesi Utara, sehingga model bumi yang diperoleh benar-benar menggambarkan daerah tersebut secara lebih tepat.

- 
3. Perlu adanya upaya pemerintah untuk mengoptimalkan fungsi kerja alat pencatat gempa bumi pada stasiun-stasiun yang tersebar di Sulawesi Utara, sehingga tidak dijumpai lagi *event* gempa yang tidak terekam salah satu atau ketiga komponennya (N, E, dan Z)
 4. Perlu adanya perencanaan dari pemerintah untuk menambah stasiun di daerah rawan gempa, sehingga posisinya memungkinkan dapat mengitari pusat sumber gempa yang terjadi pada masa mendatang

DAFTAR PUSTAKA

Menke, W. 1993. *Geophysical Data Analysis: Discrete: Discrete Inverse Theory*. Academic Press.

Zahradnik, J., Gallovic F., E. Sokos, A. Serpetsidaki and G-A. Tselintis., 2008, *Quick Fault-Plane Identification by a Geometrical Method: Application to the Mw 6.2 Leonidio Earthquake*, 6 January 2008, Greece Seismological Research Letters Volume 79, Number 5, September/October 2008, 653-662

Zahradnik J., Serpetsidaki A., Sokos, E. and Tselentis G.A, 2006, Iterative deconvolution of regional waveforms and a double-event interpretation of the lefkada earthquake, Greece.

Madlazim. 2011. Estimasi CMT, Bidang Sesar dan Durasi Rupture Gempa Bumi di Sumatera serta Kemungkinan Peringatan Dini Tsunami

Rahmania, Merdiani, Thaقيبul Fikri Niyartama dan Ari Sungkono. 2010. Penentuan Jenis Sesar pada Gempa Bumi Sukabumi 2 September 2009 Berdasarkan Gerak Awal Gelombang-P. Seminar Nasional VI SDM Teknologi Nuklir ISSN 1978-0176, Yogyakarta

Papazachos, Scordilis E.M Panagiotopoulos dan Karakaisis G.F. 2004. *Global Relation Between Seismic Fault Parameters and Moment Magnitude of Earthquake*. Bulletin of the Geological Society of Greece Vol XXXVI.

Sokos, and Zahradnik, J., 2008, *ISOLA a Fortran Code and a Matlab GUI to Perform Multiple-Point Source Inversion of Seismic Data*. Computers & Geosciences 34, 967-977

Masykur, M. Romli. 2011. *Analisis Inversi Waveform Tiga Komponen Untuk Menentukan Pola Bidang Sesar Gempa Bumi di Daerah Jawa Barat*. Surabaya. Tesis Jurusan Fisika FMIPA ITS Surabaya.

Shearer, P.M. 2009. Introduction to Seismology Second Edition. Cambridge University Press. USA.

Suardi, I. 2006. Penentuan Parameter dan Sumber Gempa Bumi dengan Cepat yang Terjadi di Daerah Indonesia. Kursus Seismologi di BMKG. 2006-2007.

Kayal, J.R., 2008. Microearthquake Seismology and Seismotectonics of South Asia, Springer. India.

Apel, EV., Burgmann, R., Steblov, G., Vasilenko, N., King R., Orytkov. 2006. *Independent Active Microplate Tectonics of Notheast Asia from GPS Velocities and Block Modeling*. Geophysics Research Letters 33.

Isnawati, Titin. 2011. Mekanisme Fokus Gempa Bumi Mentawai 25 Oktober 2010. Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah

Lay, T. and Wallace, Terry C., 1995, Modern Global Seismology, Academic Press, New York, USA, 521p.

Santoso, B.J. 2008. *Analyzing the Seismogram of the Earthquake on Sumatra Java Subduction Plane at CHTO Observation Station*, Jurnal MIPA, 13:25,-43.

Afnimar. 2009. Seismologi Edisi Pertama. Institut Teknologi Bandung. Bandung

Harmadhoni, David. 2011. Analisis Mekanisme Fokus Gempa di Blitar Tawa-Timur 17 Mei 2011, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah

Steith, Stein. Michael Wyssession. 2003. *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*. Oxford: Blackwell Publishing Ltd.

Bowler, Sue. 2003. Bumi yang Gelisah. Jakarta; Erlangga.

Setyowidodo, Irwan, Bagus Jaya Santosa. *Analisis Seismogram Tiga Komponen terhadap Momen Tensor Gempa Bumi di Manokwari Papua 03 Januari 2009*. Jurnal Neutrino (2011) april Vol.3, No.2

Aki, K. and Richards, P.G., 1980, Quantitative Seismology: Theory and Methods, W.H. Freeman, San Francisco, CA.

Bouchon, M., 1981. A Simple Method to Calculate Green's Function for Elastic Layered Media, *Bull Seis Am.*, 71: 959-971.

Bouchon, M., 2003. A Review of The Discrete Wavenumber Method, *Pure Appl. Geophys.* 160: 445-465.

Chulick, G. S. and Mooney, W. D., 2002. Seismic Structure of The Crust and Uppermost Mantle of North America and Adjacent Basins: A Synthesis, *Bull Seis Soc Am.*, 92: 2478-2492.

Clinton J. F., Hauksson, E. and Solanki, K., 2006. An Evaluation of The SCSN Moment Tensor Solutions: Robustness of The Magnitude Scale, Style and Automation of The Method. *Bull Seis Soc Am.*, 96: 1689-1705.

Dahlen, F. A., and Tromp, J., 1998. *Theoretical Global Seismology*, 1025 pages, Princeton University Press, Princeton, NJ.

Dreger D. and Woods B., 2002. Regional Distance Seismic Moment Tensors of Nuclear Eplosions. *Tectonophysics* 356(1-3); 139-156.

Frohlich, C., 1994. Earthquakes With Non-Double-Couple Mechanisms. *Science* 264: 804-809.

Frohlich, C., 1995. Characteristics of Well-Determined Non Double-Couple Earthquakes in the Harvard CMT Catalog. *Phys Earth Plate Int* 91: 213-228.

Gomez. J. M., Madariaga, R., Walperdorf, A., and Chalard, E., 2000. The 1996 Earthquakes in Sulawesi, Indonesia, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90: 739-751.

Gordon, R., and Jurdy, D., 1986. Cenozoic Global Plate Motions, *J. Geophys. Res.*, 91(B12), 12389-12406.

Horalek, J., Silenly, J., and Fischer, T., 2002. Moment Tensors of The January 1997 Earthquake Swarm in NW Bohemia (Czech Republic): Double-Couple vs Nondouble-Couple Events. *Tectonophysics* 356: 65-85.

Muhammad Mifta Hasan, Bagus J., 2014. Analisa Pola Bidang Sesar pada Zona Subduksi di Wilayah Sumatera Barat dari Event Gempa pada Tahun 2013, *Jurnal Sains dan Seni POMITS*, Vol.3 No.2 ISSN: 2337-3520.

Muh. Rodli Masykur, Bagus J. S., 2010., Analisis Waveform Tiga Komponen Untuk Menentukan Momen Tensor Gempa Bumi di Pulau Jawa Pada Tahun 2010.

Depta Mahardika S, Bagus J. S., 2014., Estimasi Momen Tensor, Pola Bidang Sesar dan Mekanisme Fokus Gempa Tohoku-Oki Jepang Pada Tahun 2011 Dengan Memanfaatkan Inversi *Waveform* Tiga Komponen Menggunakan Program ISOLA.

Sayyidatul Khoiridah, Bagus J. S., 2014., Estimasi Centroid Momen Tensor (CMT), Bidang Sesar, Durasi Rupture, dan Pemodelan Deformasi Vertikal Sumber Gempa Bumi Sebagai Studi Potensi Bahaya Tsunami di Laut Selatan Jawa, *Jurnal Sains dan Seni POMITS*, Vol.3 No.2 ISSN: 2337-3520.

Eka Jaya Wifayanti, Bagus J. S., Estimasi Pola Bidang Sesar dan Moment Tensor Gempa Bumi Jepang Pada Tahun 2003 Menggunakan Analisis Inversi Waveform Tiga Komponen, 2014., Jurnal Sains dan Seni POMITS, Vol.3, No.2 ISSN: 2337-3520.

Riski Salim, Bagus J. S., Analisa Pola Bidang Sesar Pada Zona Subduksi di Wilayah Selatan Pulau Sumatera dari Event Gempa Pada Tahun 2011-2014, 2014., Jurnal teknik POMITS, Vol.3, No.2 ISSN: 2337-3539.

Moh Ikhyaul Ibad, Bagus J. S., Pemodelan Tsunami Berdasarkan parameter Mekanisme Sumber Gempa Bumi dari Analisis Waveform tiga Komponen Gempa Bumi Mentawai 25 Oktober 2010, 2014., Jurnal Sains dan Seni POMITS Vol.3 No.2 ISSN: 2337-3520.

Lilis Eka Rachmawati, Bagus J. S., Estimasi Moment Tensor dan Pola Bidang Sesar Pada Zona Subduksi di wilayah Sumatera Utara Periode 2012-2014, 2014., Vol.3 No.2 ISSN: 2337-3520.

Irsyam, M., Sengara, W., Aldiarnar, F., Widiyantoro, S., Triyoso, W., Hilman, D., Kertapati, E., Meilano, I., Suhardjono, Ausrurifak, M., Ridwan, M., 2010. Ringkasan Hasil Studi Tim Revisi Gempa Indonesia 2010, bandung.

Julian, B. R., Miller, A. D., Foulger, G. R., 1998. Non-double Couple Earthquake 1. *Theory. Rev Geophys.* 36: 525-549.

Kikuchi, M. and Kanamori H., 1991. Inversion of Complex Body Waves – III, *Bulletin of The Bull. Seism. Soc. Am.*, 81: 2335-235.

Ohnaka, M., 1976. A Physical Basis for Earthquakes Based on The Elastic Rebound Model, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 66: 433-451.

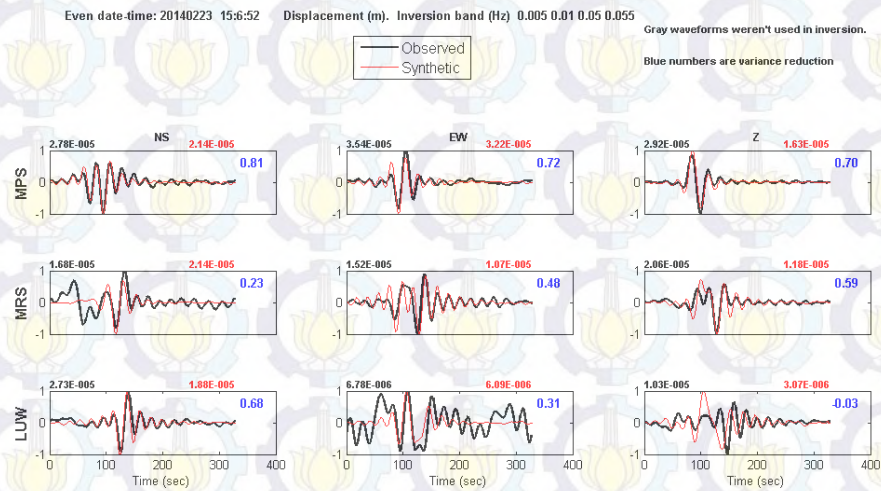
Madlazim, Bagus, J. S., and Utama, W., 2010. Seismic Moment Tensors of 200909930 Event in Padang and 20091001 in Jambi Using Three Components Local Waveform: Identification of The Activated Fault Plane, *Indonesian Journal of Physics*, 21(4).

Yeats, R., Sieh, K. and Allen, C., 1997. The Geology of Earthquakes, 568 pp., Oxford Univ., Press, New York.

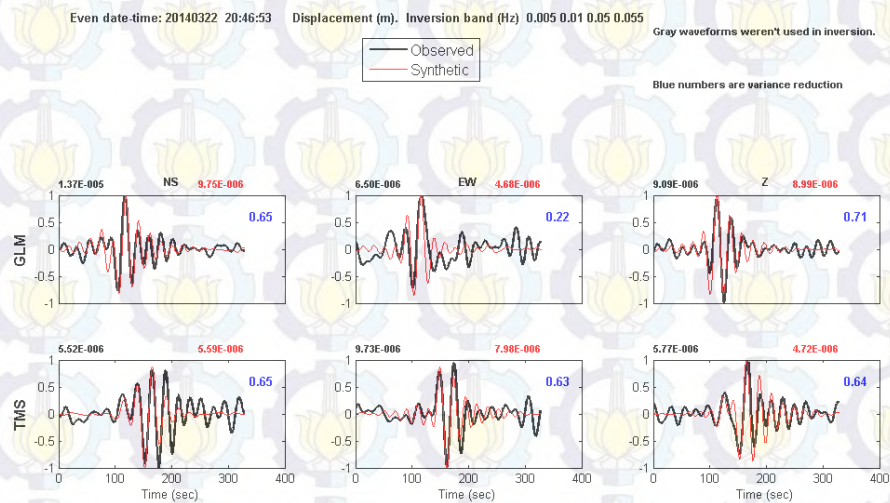
LAMPIRAN A

Hasil Fitting Kurva Sintetik dan Kurva Seismogram

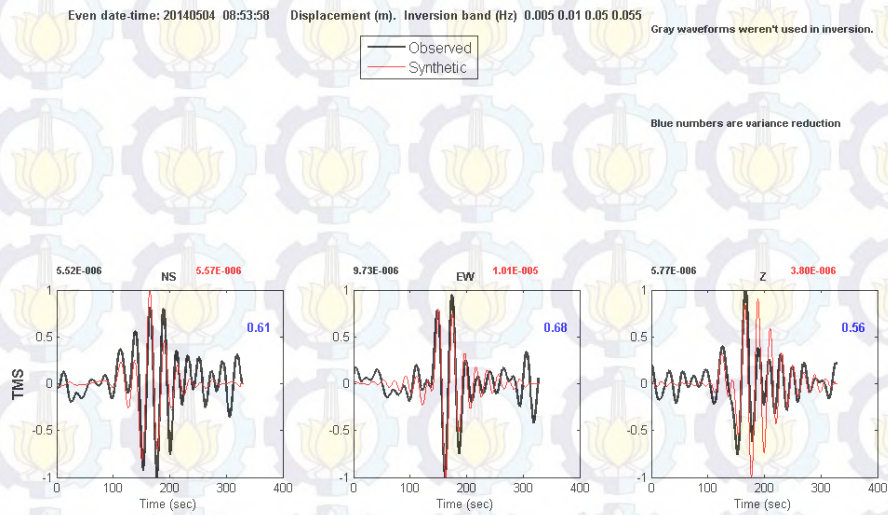
1. Fitting kurva *displacement* untuk *event* gempa 20140223_15:06:52.



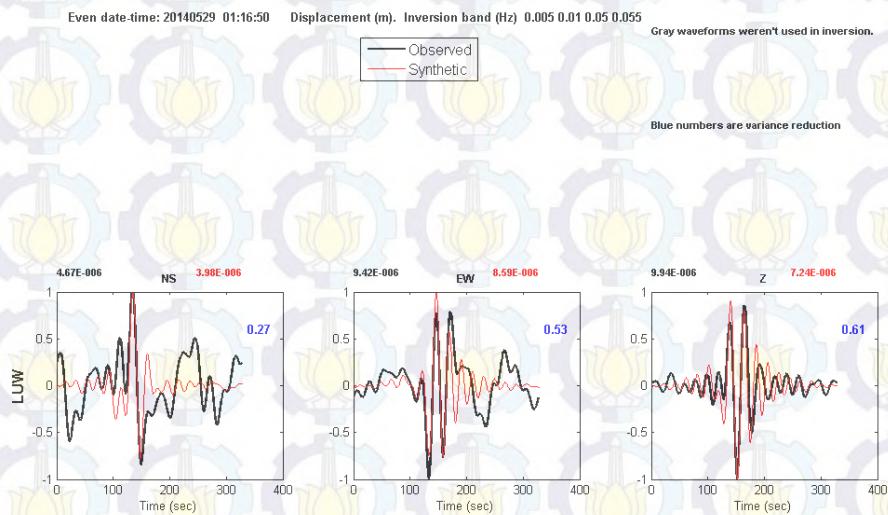
2. Fitting kurva *displacement* untuk *event* gempa 20140322_20:46:53.



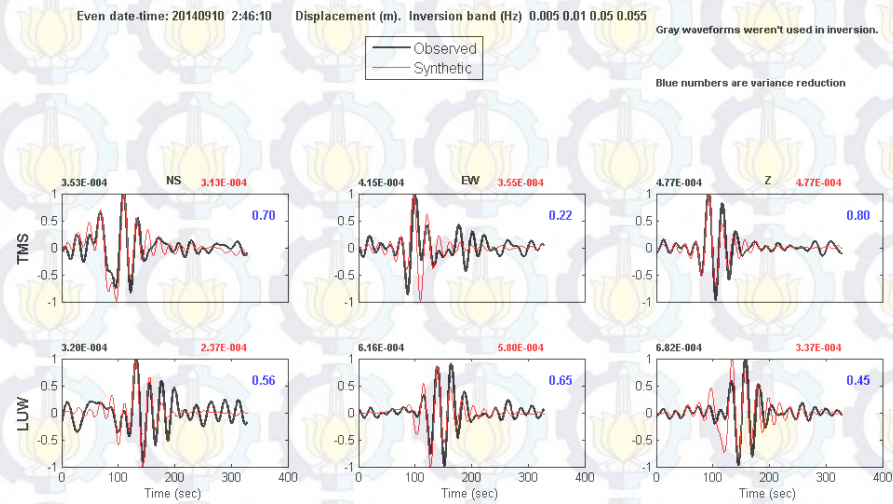
3. Fitting kurva *displacement* untuk event gempa 20140504_08:53:58.



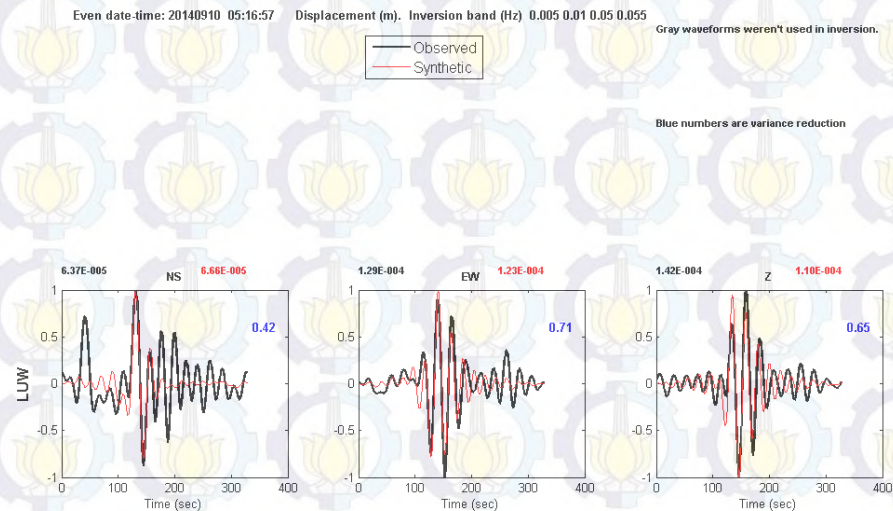
4. Fitting kurva *displacement* untuk event gempa 20140529_01:16:50.



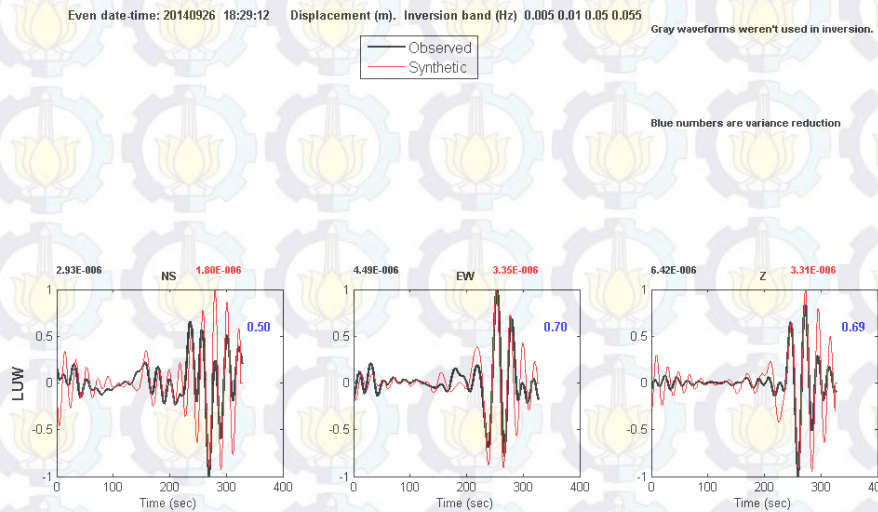
5. Fitting kurva *displacement* untuk *event* gempa 20140910_02:46:10.



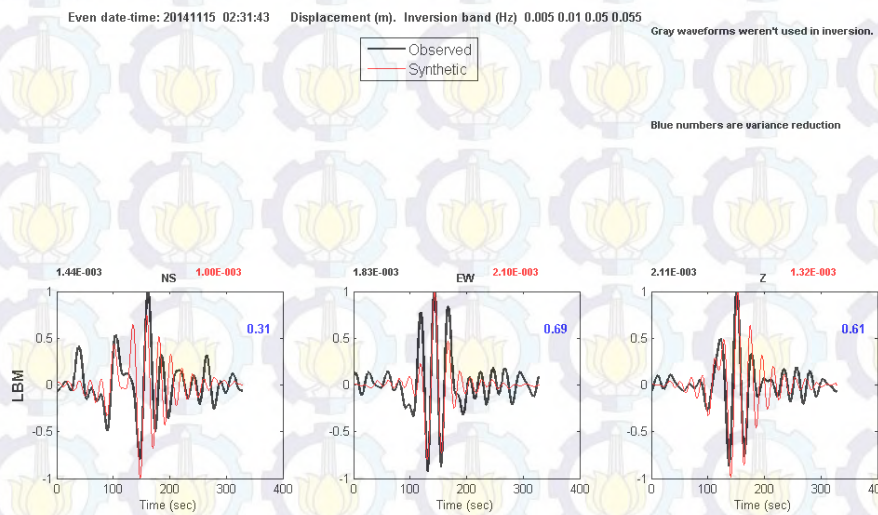
6. Fitting kurva *displacement* untuk *event* gempa 20140910_05:16:57.



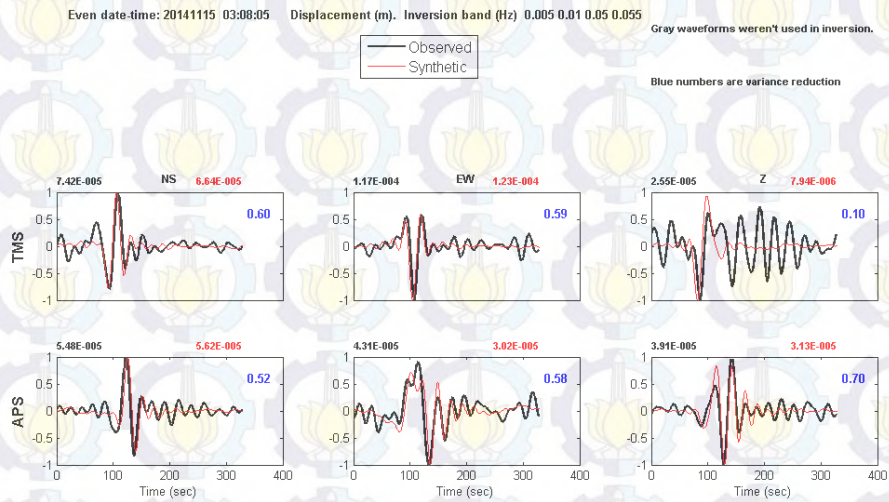
7. Fitting kurva *displacement* untuk *event* gempa 20140926_18:29:12.



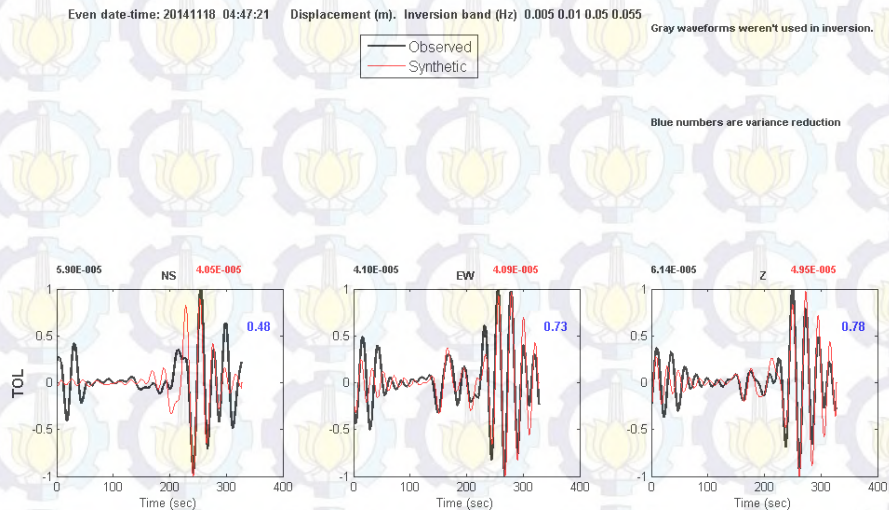
8. Fitting kurva *displacement* untuk *event* gempa 20141115_02:31:43.



9. Fitting kurva *displacement* untuk event gempa 20141115_03:08:05.



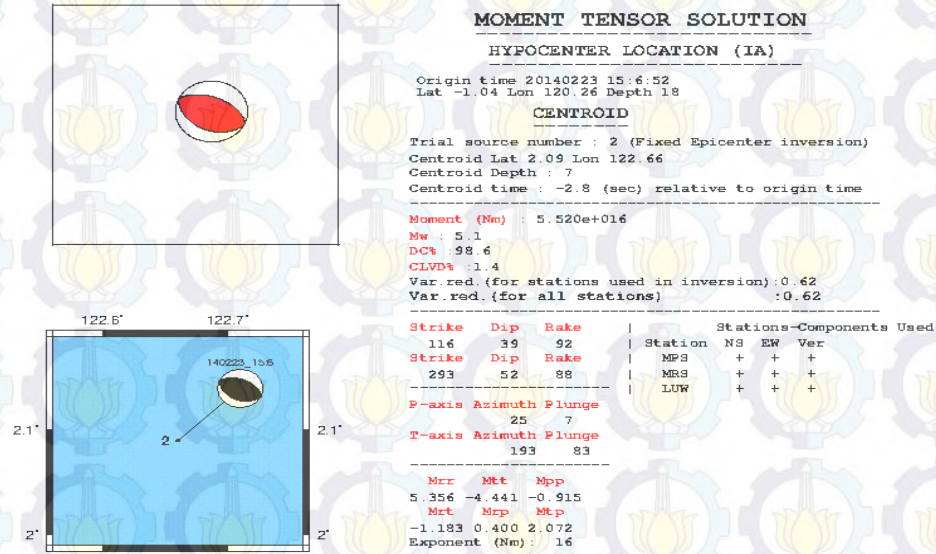
10. Fitting kurva *displacement* untuk event gempa 20141118_04:47:21.



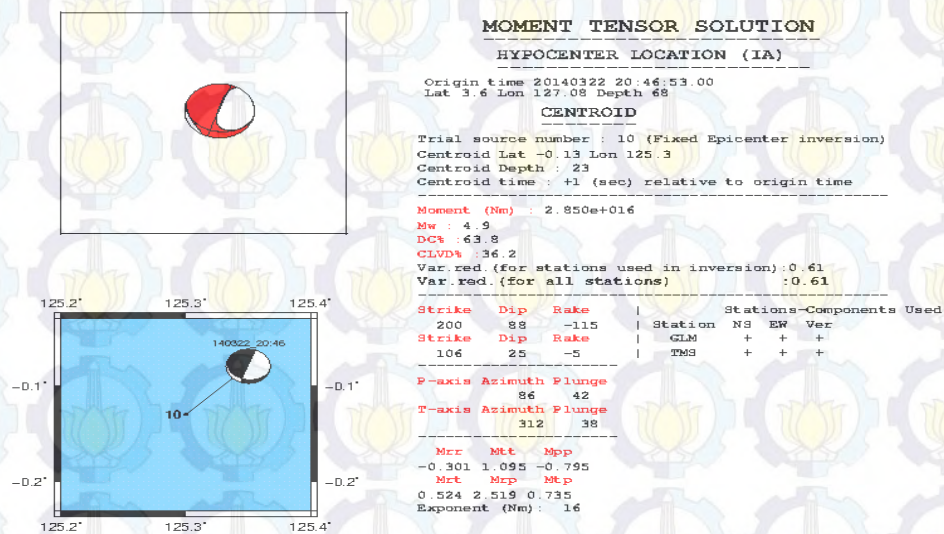
LAMPIRAN B

Hasil Inversi Moment Tensor

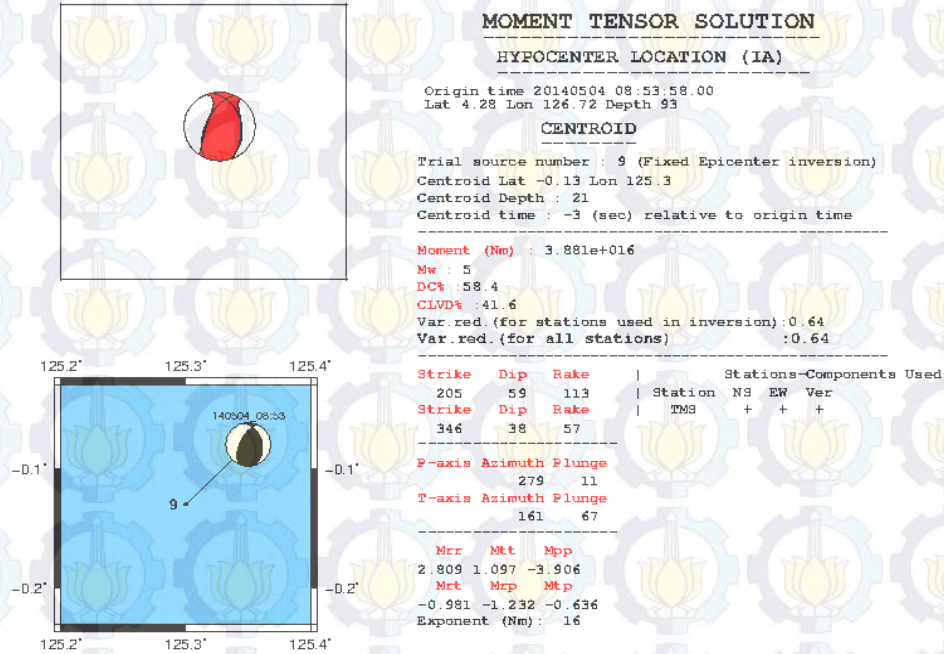
- Hasil mekanisme fokus gempa dalam bentuk *beach ball* untuk event gempa 20140223_15:06:52.



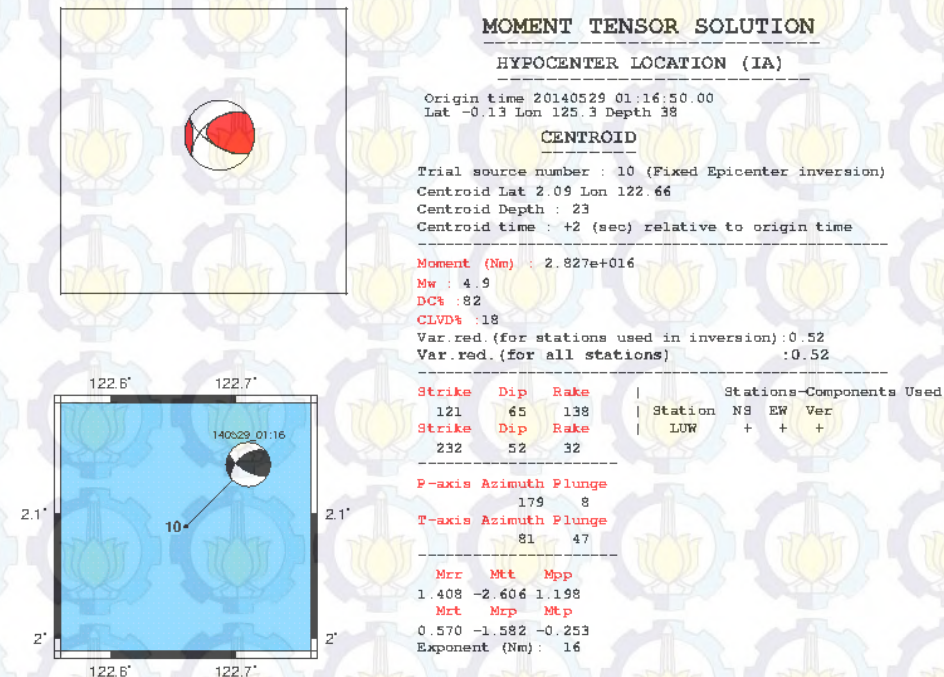
- Hasil mekanisme fokus gempa dalam bentuk *beach ball* untuk event gempa 20140322_20:46:53.



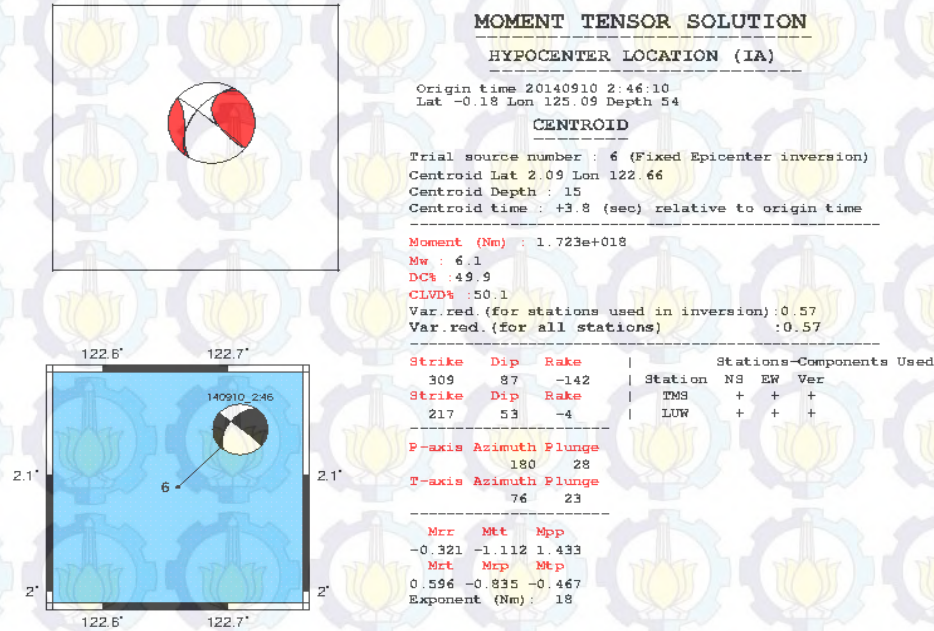
3. Hasil mekanisme fokus gempa dalam bentuk *beach ball* untuk event gempa 20140504_08:53:58.



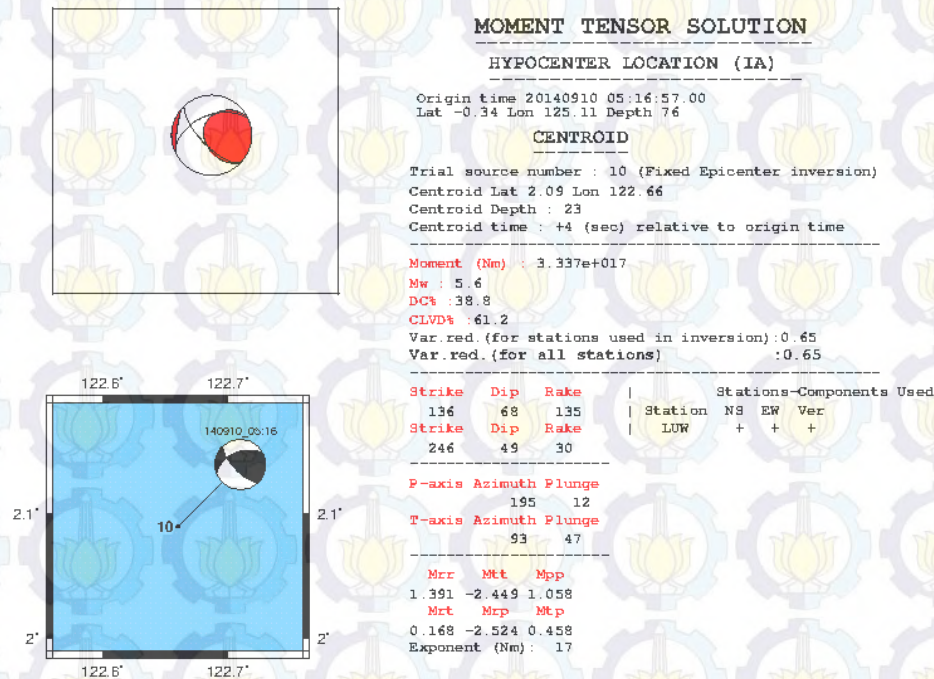
4. Hasil mekanisme fokus gempa dalam bentuk *beach ball* untuk event gempa 20140529_01:16:50.



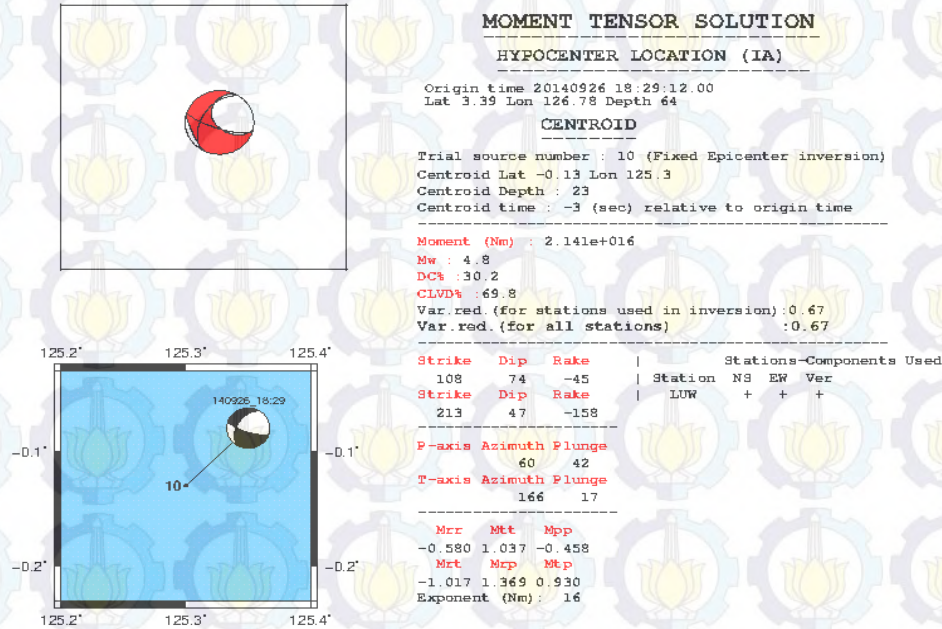
5. Hasil mekanisme fokus gempa dalam bentuk *beach ball* untuk event gempa 20140910_02:46:10.



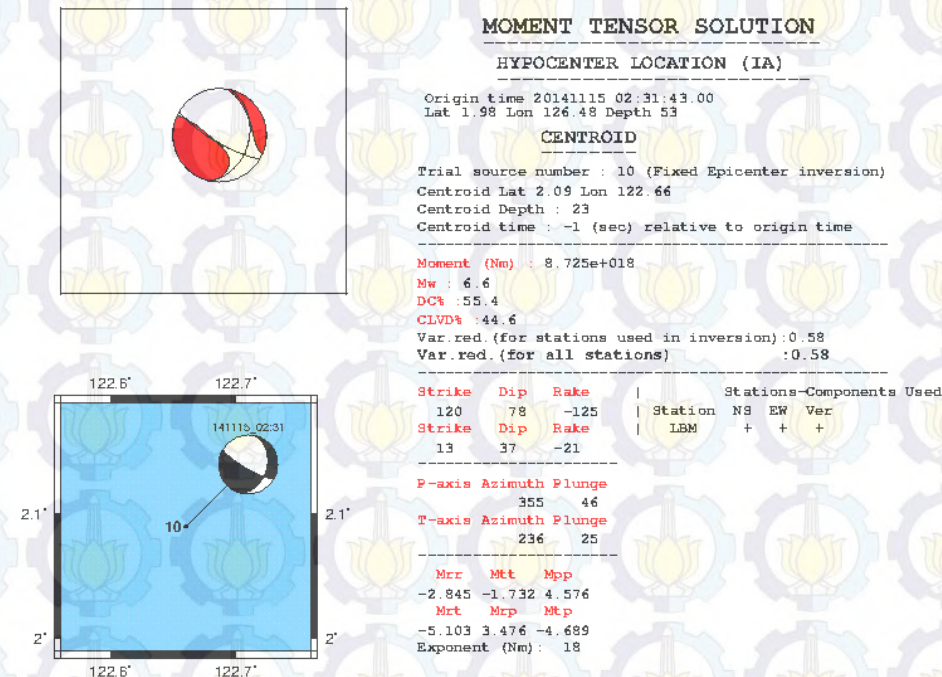
6. Hasil mekanisme fokus gempa dalam bentuk *beach ball* untuk event gempa 20140910_05:16:57.



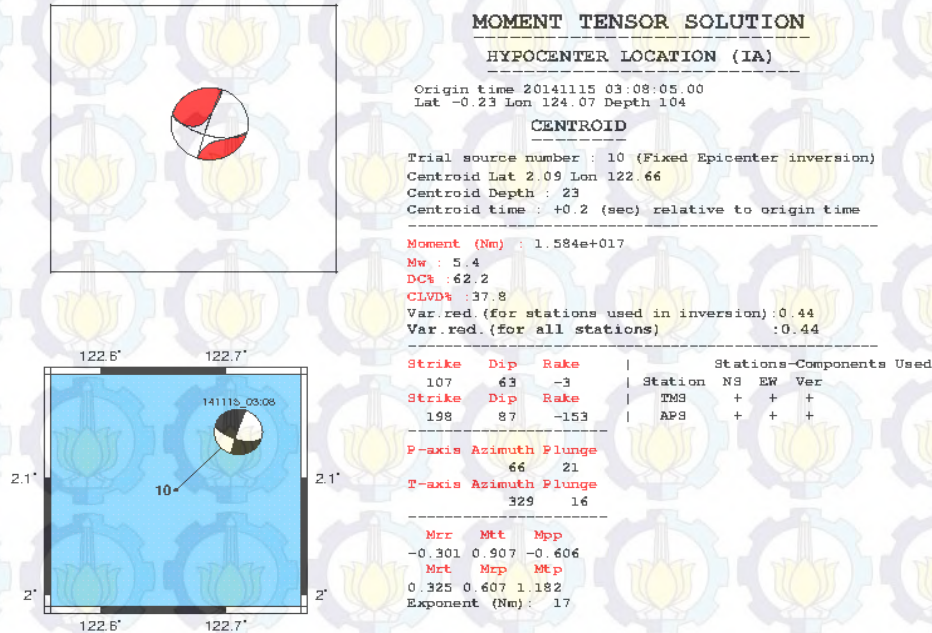
7. Hasil mekanisme fokus gempa dalam bentuk *beach ball* untuk event gempa 20140926_18:29:12.



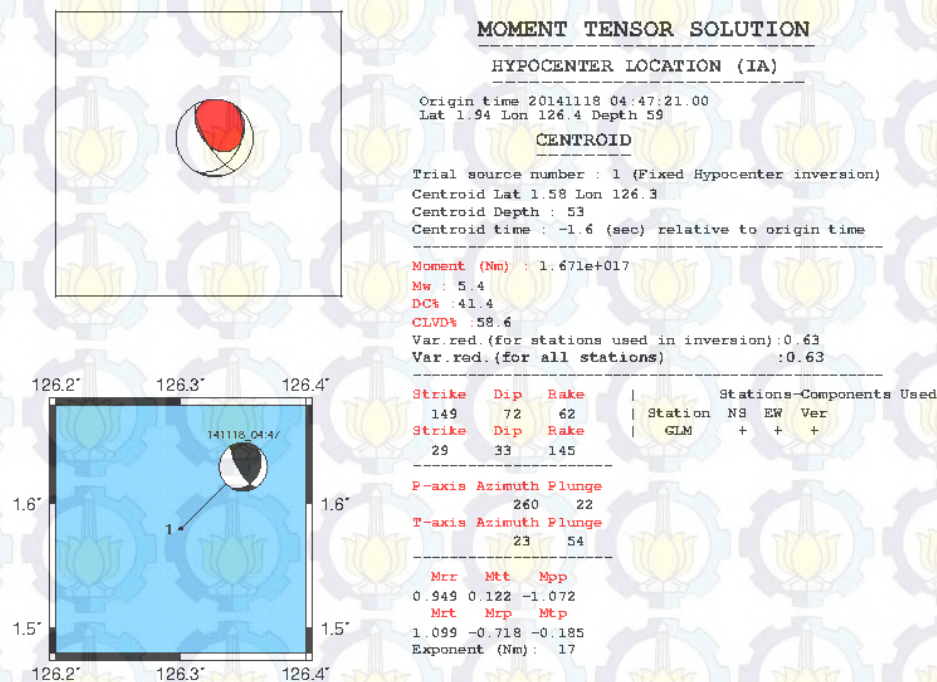
8. Hasil mekanisme fokus gempa dalam bentuk *beach ball* untuk event gempa 20141115_02:31:43.



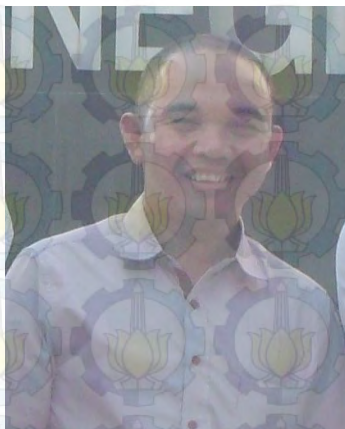
9. Hasil mekanisme fokus gempa dalam bentuk *beach ball* untuk event gempa 20141115_03:08:05.



10. Hasil mekanisme fokus gempa dalam bentuk *beach ball* untuk event gempa 20141118_04:47:21.



BIOGRAFI PENULIS



Iskandar Zulkarnaen, berasal dari Desa Sabadolok, Kec. Kotanopan, Kab. Madina, Sumatera Utara. Penulis lahir di Desa Sabadolok pada tanggal 25 Desember 1973, merupakan anak kedua dari sepuluh bersaudara pasangan Marwan Syah Lubis dan Masdalifah. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN 144461 Desa Sabadolok-Singengu, SMPN 1 Kotanopan, SMAN 1 Kotanopan dan S1

Fisika Universitas Sumatera Utara angkatan 1994. Setelah lulus S1 pada tahun 2001, penulis bekerja di Bimbingan Belajar Ganesha Operation sebagai Staf Pengajar Fisika. Penulis juga pernah menjadi staf pengajar di Sekolah Tinggi Ilmu Perikanan Sibolga Fisika (STPS). Pada tahun 2013 melanjutkan studi S2 di Jurusan Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) dengan bidang keahlian Fisika Geofisika. Selama menjadi mahasiswa S2 Fisika ITS, penulis pernah mengikuti publikasi artikel ilmiah dalam *Seminar Nasional Fisika 2015* di Jakarta. Akhir kata apabila ada kritik dan saran, dapat dikirimkan ke: iskandar13@mhs.physics.its.ac.id.

ANALISIS INVERSI WAVEFORM TIGA KOMPONEN UNTUK MENENTUKAN MOMEN TENSOR, POLA BIDANG SESAR, DAN MEKANISME FOKUS GEMPA SULAWESI UTARA

Iskandar Zulkarnaen^{1*)}, Bagus Jaya Santosa²

¹Prodi Geofisika, Jurusan Fisika, FMIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Surabaya 60111

*)Email: iskandar13@mhs.physics.its.ac.id

Abstrak

Pemahaman terhadap karakteristik sesar yang mengakibatkan gempa bumi diperlukan untuk memperkirakan atau mengetahui karakter dan akibat kegempaan. Penentuan momen tensor dilakukan dengan inversi waveform tiga komponen dengan metode iterasi dekonvolusi menggunakan software ISOLA-GUI. Penelitian ini diawali dengan request event gempa. Kemudian dilakukan konversi dan preprocessing data, input data yang meliputi : crustal model, event info, memilih stasiun, persiapan data mentah, dan pendefinisian sumber seismik, menghitung fungsi Green, melakukan inversi dan plot hasil inversi. Selanjutnya menggambarkan Fault-Plane penyebab gempa bumi menggunakan software hc-plot. Momen tensor menggambarkan gaya-gaya yang bekerja pada pusat sumber gempa, sedangkan slip menggambarkan besarnya displacement yang terjadi. Dari hasil inversi diperoleh solusi parameter sesar yaitu strike, dip, dan rake untuk dua nodal yang akan dianalisa untuk menentukan bidang patahan. Hasil inversi momen tensor direpresentasikan dengan menggunakan beach ball yang menggambarkan daerah kompresi dan dilatasi.

Kata kunci: Gempa Bumi, momen tensor, inversi waveform tiga komponen.

Abstract

Understanding of the characteristics that lead to an earthquake fault is required to estimate or determine the character and consequences of seismicity. Determination of the moment tensor inversion waveform is done by three components of the iterative deconvolution method using ISOLA-GUI software. This research begins with a request event earthquake. Then do the conversion and preprocessing of data, input data include: crustal models, event info, select a station, preparation of the raw data, and defining the seismic source, calculate the Green's function, perform the inversion and inversion results plot. Furthermore describe Fault-Plane cause earthquakes using software hc-plot. Moment tensor describe the forces acting on the center of the earthquake, while the slip illustrate the magnitude of displacement that occurred. From the results obtained solution inversion of fault parameters, namely the strike, dip, and rake for two nodal which will be analyzed to determine the fault plane. Moment tensor inversion results using a beach ball represented by describing the area of compression and dilation.

Keywords: Earthquake, Moment Tensor, Inverse Waveform three components.

1. Pendahuluan

Wilayah Indonesia timur khususnya Sulawesi dan sekitarnya merupakan daerah yang kompleks karena merupakan tempat pertemuan tiga lempeng besar yaitu: lempeng Indo-Australia yang bergerak ke arah utara, lempeng Pasifik yang bergerak ke arah barat dan lempeng Eurasia yang bergerak ke arah selatan-tenggara serta lempeng yang lebih kecil yaitu lempeng Filifina.

Sulawesi Utara di sebelah timur terdapat zona subduksi yaitu penunjaman lempeng laut Maluku di bawah busur Kepulauan Sulawesi dan di bawah pulau Halmahera. Sedangkan di sebelah utara terdapat palung laut dalam yang disebut palung laut Minahasa. Palung ini merupakan tempat penekukan lempengan laut Sulawesi ke bawah busur Kepulauan Sulawesi Utara. Subduksi ini dapat menimbulkan gempa bumi dengan kedalaman dangkal dan menengah di Sulawesi Utara.

Untuk mengurangi ancaman dan sebagai upaya mitigasi bencana, maka perlu dilakukan kajian yang lebih mendalam. Salah satu yang perlu diketahui adalah mekanisme sumber gempa dan karakteristik arah gerak sesar.

Pemahaman terhadap karakteristik sesar yang mengakibatkan gempa bumi diperlukan untuk memperkirakan atau mengetahui karakter dan akibat kegempaan. Untuk mengetahui karakteristik ini dapat dilakukan dengan memodelkan momen tensor gempa bumi (Shearer, 2009). Pemodelan momen tensor ini dapat dilakukan dengan menggunakan metode inversi yang memanfaatkan waktu gelombang-P dan diestimasi dengan menggunakan fungsi Green tiga komponen (Zahradnick, 2008). Hasil analisis ini berupa parameter-parameter gempa bumi yang meliputi; skala, kedalaman, dan energi gempa bumi serta model patahan penyebab gempa bumi.

2. Metode Penelitian

A. Pengambilan Data

Data yang digunakan adalah data gempa bumi Sulawesi Utara 2014-2015 dengan magnitude $\geq 5,0$. Data gempa didapatkan dari www.webdc.ec website dari GFZ yang menyediakan data gempa lokal.

B. Pengolahan Data

Data yang didapatkan dari GFZ dalam format seed. Dirubah kedalam format SAC yang akan digunakan dalam program ISOLA-GUI untuk menentukan momen tensor dan focal mechanism [2,3]. Sebelum dilakukan perhitungan, terlebih dahulu ditentukan model bumi yang digunakan. Penelitian ini menggunakan model bumi Haslinger-Santosa (H-S) [4].

C. Perhitungan Data

Perhitungan Dimensi Sesar

Perhitungan dimensi sesar disesuaikan berdasarkan pola sesar yang ditunjukkan oleh beach ball dari hasil inversi. Adapun perhitungan besar dimensi sesar yang digunakan adalah:

1. Perhitungan Strike-Slip fault

a. Panjang Sesar (L)
 $\log L = 0,59M_w - 2,30$ (1)

b. Lebar Sesar (W)
 $\log W = 0,23M_w - 0,49$ (2)

c. Luas Sesar (A)
 $\log A = 0,82M_w - 2,79$ (3)

2. Perhitungan Dip-Slip Fault

a. Panjang Sesar (L)
 $\log L = 0,55M_w - 2,19$ (4)

b. Lebar Sesar (W)
 $\log W = 0,31M_w - 0,63$ (5)

c. Luas Sesar (A)
 $\log A = 0,86M_w - 2,82$ (6)

(Papazachos et al, 2004)

Perhitungan Displacement/Slip

Perhitungan slip gempa dilakukan dengan menggunakan hubungan displacement dengan momen seismic gempa. Yaitu dengan menggunakan persamaan:

$$M_o = \mu \cdot A \cdot D \quad (7)$$

Sehingga besarnya slip yang menyebabkan gempa dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$D = \frac{M_o}{\mu \cdot A} \quad (8)$$

(Madlazim, 2011)

3. Hasil dan Pembahasan

A. Hasil

Besar momen tensor dari masing-masing event gempa sebagai berikut:

Tabel 1. Momen tensor untuk gempa Sulawesi Utara

Event	$M_{rr} = M_{33}$	$M_{tt} = M_{11}$	$M_{pp} = M_{22}$	$M_{rt} = M_{31}$	$M_{rp} = M_{32}$	$M_{tp} = M_{12}$	Exp
2014 0223	5.35 6	-4.4 41	-0.9 15	-1.1 83	0.4 00	2.0 72	16
2014 0322	-0.3 01	1.09 5	-0.7 95	0.5 24	2.5 19	0.7 35	16
2015 0504	2.8 09	1.09 7	-3.9 06	-0.9 81	-1.2 32	-0.6 36	16
2014 0529	1.4 08	-2.6 06	1.19 8	0.5 70	-1.5 82	-0.2 53	16
2014 0910	-0.3 21	-1.1 33	1.4 96	0.5 96	-0.8 35	-0.4 67	18
2014 0910	1.39 1	-2.4 49	1.05 8	0.1 68	-2.5 24	0.4 58	17

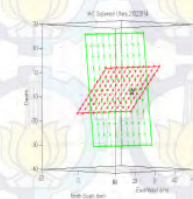
2014 0926	-0.5 80	1.0 37	-0.4 58	-1.0 17	1.3 69	0.9 30	16
2014 1115	-2.8 45	-1.7 32	4.5 76	-5.1 03	3.4 76	-4.6 89	18
2014 1115	-0.8 04	2.4 45	-1.6 41	0.5 84	1.3 31	3.2 79	17
2014 1118	0.9 49	0.1 22	-1.0 72	1.0 99	-0.7 18	-0.1 85	17

Bidang sesar dan auxiliary plane dari masing-masing event gempa sebagai berikut:

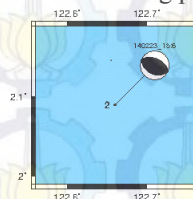
Tabel 2. Bidang sesar dan auxiliary plane

Event t	Plane I			Plane II		
	Strike	Dip	Rake	Strike	Dip	Rake
2014 0223	116	39	92	293	52	88
2014 0322	200	88	-115	106	25	-5
2014 0504	205	59	113	346	38	57
2014 0529	121	65	138	232	52	32
2014 0910	309	87	-142	217	53	-4
2014 0910	136	68	135	246	49	30
2014 0926	108	74	-45	213	47	-158
2014 1115	120	78	-125	13	37	-21
2014 1115	197	86	-158	106	68	-4
2014 1118	149	72	62	29	33	145

Orientasi bidang patahan event gempa 20140223_150652.

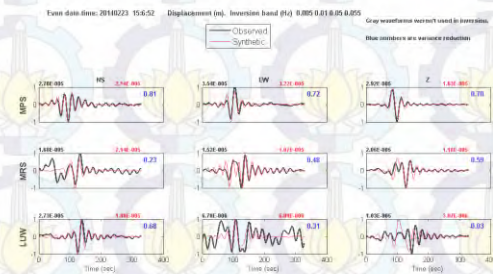


Gambar 1. Orientasi bidang patahan (merah)



Gambar 2. Bentuk beach ball dari pola bidang sesar, reverse fault untuk gempa 20140223_150652.

Fitting kurva displacement untuk event gempa 20140223_150652.



Gambar 3. Fitting kurva displacement tiga stasiun



B. Pembahasan



















Gambar 3 merupakan hasil proses inversi data seismogram dan data sintetik. Kurva warna merah adalah hasil estimasi menggunakan fungsi Green sedangkan kurva hitam merupakan kurva data seismogram. Bisa dilihat kurva hitam dan kurva merah saling tumpang tindih dengan nilai korelasi diantara keduanya > 0.5 . Korelasi ini terbilang baik jika dilihat dari fitting kurva. Korelasi antara data seismogram dan sintetik semakin baik jika mendekati nilai 1. Ini berarti antara data seismogram dan data sintetik memiliki kecocokan yang sangat baik.

Dari hasil inversi momen tensor didapatkan hasil beach ball seperti pada gambar 2. Dari hasil inversi gempa pada 20140223_150652 didapatkan letak centroid momen tensor (CMT) dari gempa berada pada kedalaman 7 km berjarak 437.33 km dari hiposenter. Prosentase DC menggambarkan sesar yang menyebabkan terjadinya gempa bumi adalah system double couple yaitu kopel ganda jika nilai DC lebih dari 75%. Sehingga ini berarti sesar yang menyebabkan gempa bumi adalah tipe sesar geser dengan medium isotropic. (Madlazim, 2011). Prosentase double couple (DC) yang dihasilkan adalah 98.6%. Berarti sesar yang menyebabkan gempa bumi adalah sesar geser dengan dominasi strike slip fault.

Sedangkan untuk besar dan arah momen tensor disediakan dalam koordinat bola yaitu r , t (theta), dan p (phi). Didapatkan $M_{rr} = M_{zz} = 5.356.10^{16}$ Nm, $M_{tt} = M_{xx} = -4.441.10^{16}$ Nm, $M_{pp} = M_{yy} = -0.915.10^{16}$ Nm, $M_{rt} = M_{xz} = -1.183.10^{16}$ Nm, $M_{rp} = -M_{yz} = 0.400.10^{16}$ Nm, dan $M_{tp} = -M_{xy} = 2.072.10^{16}$ Nm. Momen tensor menggambarkan besar dan arah gaya yang bekerja pada pusat sumber gempa bumi. Dari hasil yang didapatkan bisa dilihat jika gaya terbesar ada pada arah r atau arah z yang bersesuaian dengan arah atas.

Tabel 3. Perbandingan beach ball penelitian dengan katalog

Event	Penelitian	Global CMT
20140223-150652	 Reverse Fault	 Reverse Fault

20140322-2014653	 Oblique Fault	 Strike Fault
20140504-085358	 Oblique Fault	 Reverse Fault
20140529-011650	 Reverse Fault	 Reverse Fault
20140910-024610	 Oblique Fault	 Reverse Fault
20140910-051657	 Reverse Fault	 Reverse Fault
20140926-182912	 Oblique Fault	 Strike Slip Fault
20141115-023143	 Oblique Fault	 Strike Slip Fault
20141115-030805	 Oblique Fault	 Strike Slip Fault
20141118-044721	 Oblique Fault	 Reverse Fault

3. Kesimpulan

1. Besar momen tensor untuk masing-masing komponen dari gempa bumi Sulawesi Utara mempunyai rentang sebagai berikut:
 $M_{rr} = -0.580 \times 10^{16}$ sampai -0.321×10^{18}
 $M_{tt} = -4.441 \times 10^{16}$ sampai -1.112×10^{18}
 $M_{pp} = -3.906 \times 10^{16}$ sampai 1.433×10^{18}
 $M_{rt} = -1.183 \times 10^{16}$ sampai 4.576×10^{18}
 $M_{rp} = -1.582 \times 10^{16}$ sampai 3.476×10^{18}
 $M_{tp} = -0.636 \times 10^{16}$ sampai -0.467×10^{18}

2. Pola bidang sesar yang terjadi adalah dominasi sesar Reverse Fault dan Oblique Fault.

Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Dr.rer.nat. Bagus Jaya Santosa, SU atas bimbingannya selama penulis melakukan tesis.

Acuan Daftar

- [1] Zahradnik J., Gallovic F., E. Sokos, A. Serpetsidaki and G-A. Tselentis., *Quick Fault-Plane Identification by a Geometrical Method: Application to the Mw 6.2 Leonidio Earthquake, 6 January 2008, Greece*. Seismological Research Letters Volume 79, Number 5, September/October 2008, 653-662.
- [2] Sokos, E. N., Zahrandik, J. *ISOLA a fortran code and a Matlab GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data*. Computers Geoscience 34 (2008) 966-977.
- [3] Sokos, E. N., Zahrandik, J. *A Matlab GUI for use with ISOLA Fortran codes*. User's guide (2009)
- [4] Madlazim. *Estimasi CMT, Bidang Sesar dan Durasi RiptureGempa Bumidi Sumatera*serta Kemungkinan Penerapannya untuk Sistem Peringatan Dini Tsunami. Disertasi Jurusan Fisika FMIPA ITS Surabaya (2011).
- [5] Papazachos, Scordilis E. M Panagiotopoulos dan Karakaisis G. F. *Global relations Between Seismic Fault Parameters and Momen Magnitude of Earthquake*. Buletin of the Geological Society of Greece Vol XXXVI (2004).
- [6] Shearer, P. M. *Intrduction to Seismology second edition*. Cambridge University Press. USA (2009).
- [7] Zahradnik J., Serpetsidaki A., Sokos, E. and Tselentis G-A, *Iterative Deconvolution of Regional Waveforms and a Double-Event Interpretation of the Lefkada Earthquake, Greece, 2006*.
- [8] Santosa, B.J. *Analysing the Seismogram of the Earthquake on Sumatra Java Subduction Plane at CHTO Observation Station* Jurnal MIPA (2008), 13:25,-43.
- [9] Setyowidodo, Irwan, agus Jaya Santosa. *Analisis Seismogram Tiga Komponen terhadap Momen tensor Gempa Bumi di Manokwari Papua 03 Januari 2009*. Jurnal Neutrino (2011) April Vol.3, No.2
- [10] Aki, K. and Richards, P.G., *Quantitativ I Seismology: theory and Methods*, W.H. Freeman, san Fransisco. CA. (1980)

Analisis Inversi Waveform Tiga Komponen untuk Menentukan Momen Tensor, Pola Bidang Sesar, dan Mekanisme Fokus Gempa Sulawesi Utara Tahun 2014

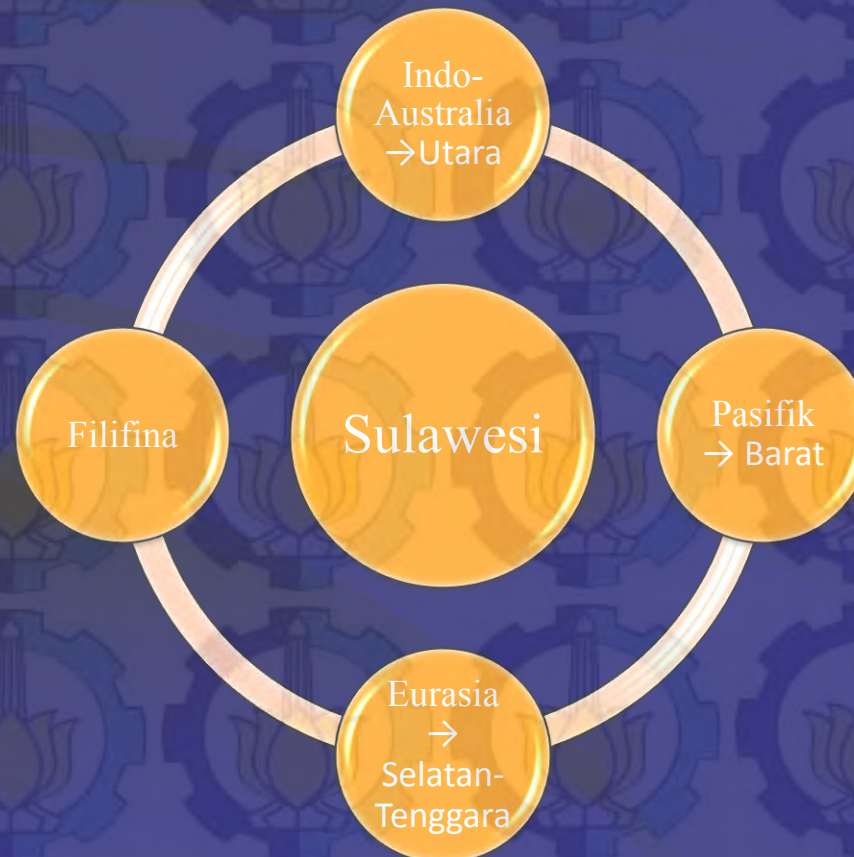
Surabaya, 25 Juni 2015



Iskandar Zulkarnaen
Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, S.U

PENDAHULUAN

- ❑ Sulawesi terletak pada pertemuan lempeng besar dan lempeng kecil.

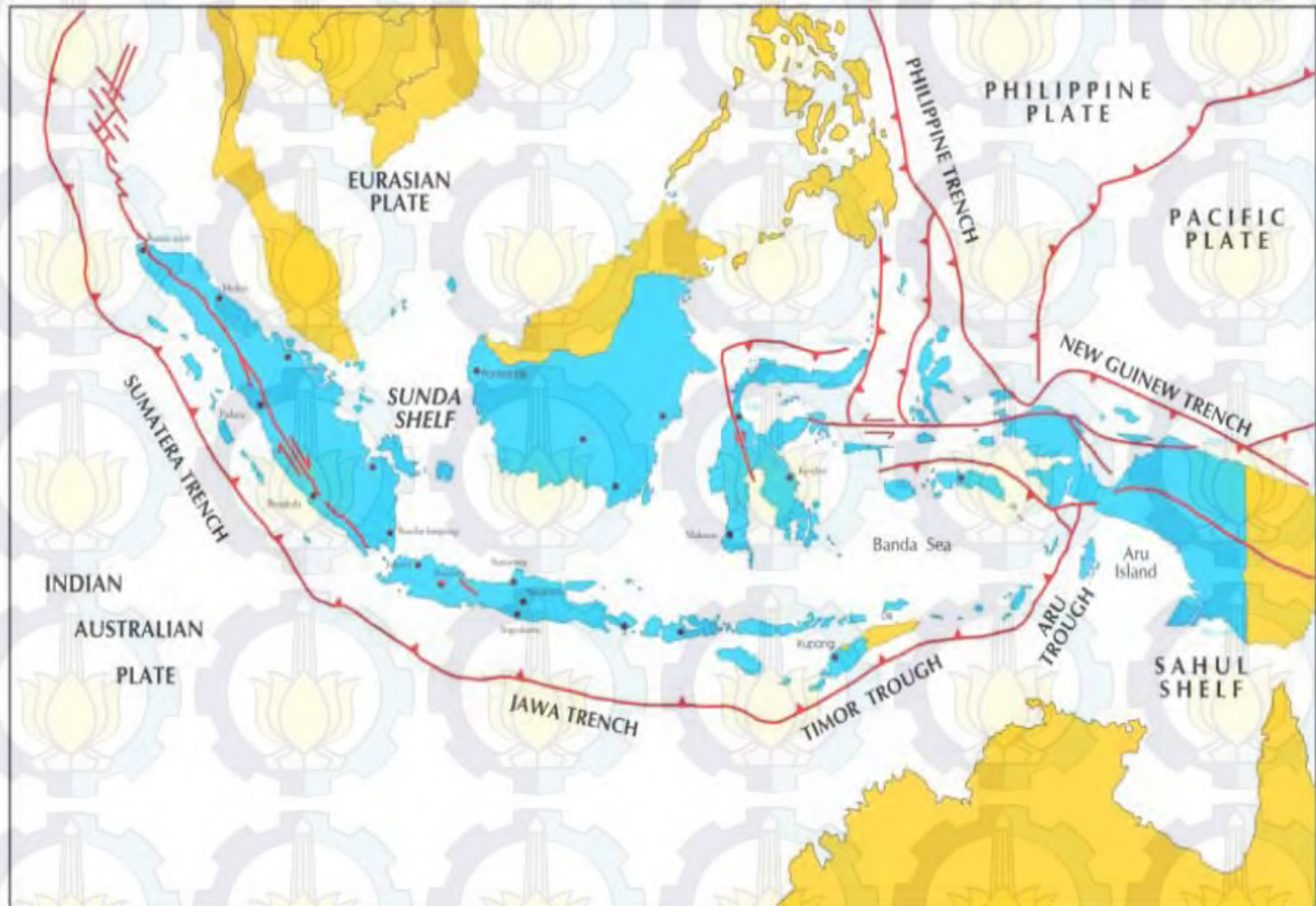


❑ Sulawesi Utara diapit zona subduksi

1. Subduksi
Lempeng Laut
Sulawesi → Selatan

2. Subduksi
Lempeng Laut
Maluku → Barat

PETA TEKTONIK KEPULAUAN INDONESIA



Patahan / sesar aktif



Zona subduksi

RUMUSAN MASALAH

- Bagaimana estimasi **Centroid Moment Tensor (CMT)** dari event gempa?
- Bagaimana menentukan **pola bidang sesar** dan **karakteristik sesar** dari mekanisme sumber gempa?
- Berapa besarnya **slip** dari sesar yang dihasilkan **event** gempa bumi?

TUJUAN dan MANFAAT PENELITIAN

TUJUAN

- Menentukan besar **momen tensor**.
- Menentukan **pola bidang sesar** dan karakteristik **sesar**.
- Menentukan besarnya slip **sesar** yang dihasilkan **event** gempa bumi.

MANFAAT

- Memberikan informasi mengenai **momen tensor**, **pola bidang sesar**, dan **mekanisme fokus** gempa **Sulawesi Utara tahun 2014**.

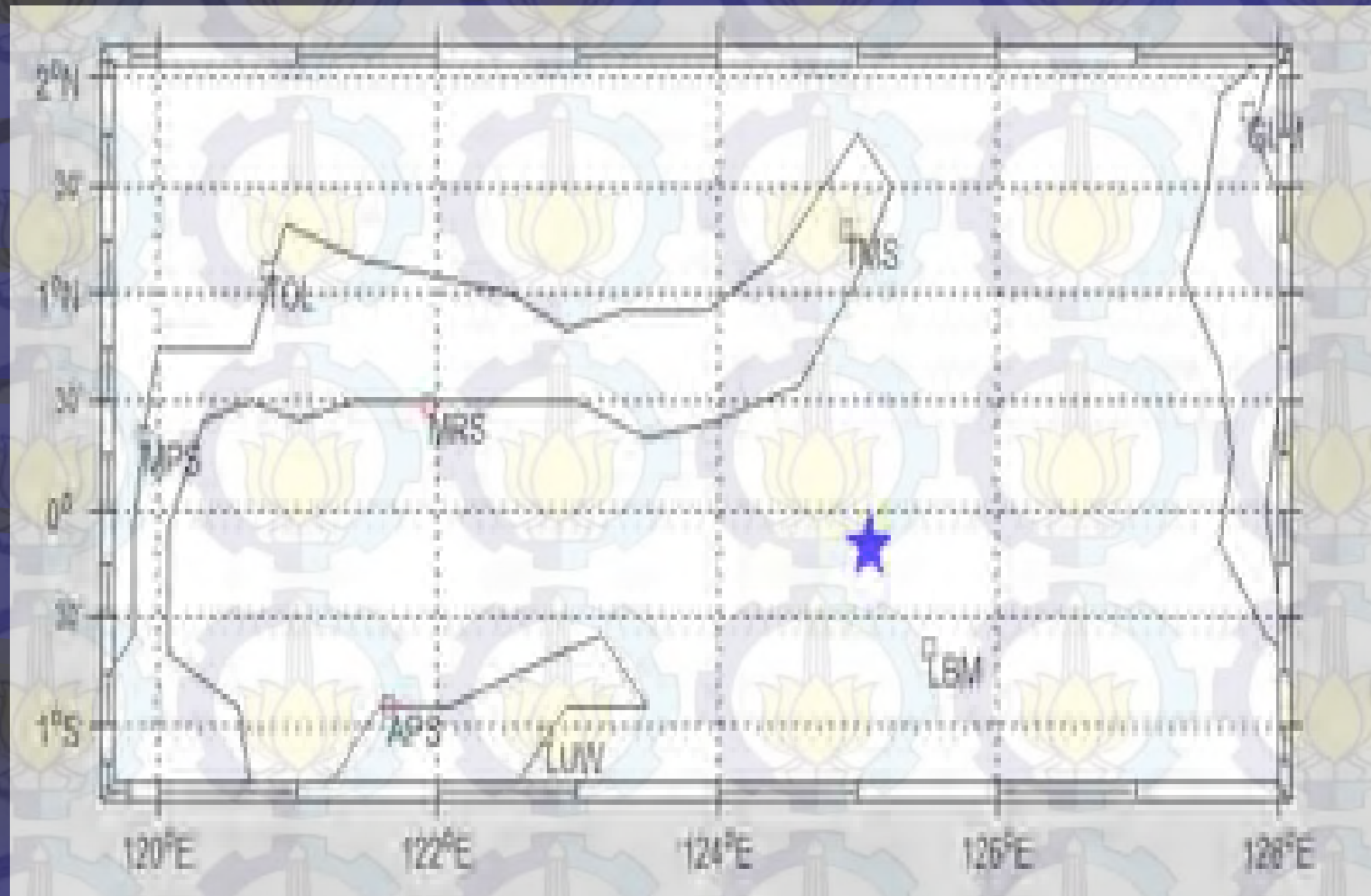
BATASAN MASALAH

- *Event* gempa adalah gempa Sulawesi Utara 2014 dari agency Geofon.
- Gempa yang akan dianalisis adalah gempa dengan $\text{magnitudo} \geq 5 \text{ SR}$.
- Request data adalah data yang memiliki **Signal to Noise Ratio (SNR)** yang tinggi.
- Rekaman data request meliputi **tiga komponen (BHN, BHE, BHZ)**.

■ Lokasi Event Gempa



■ Lokasi Station Event Gempa



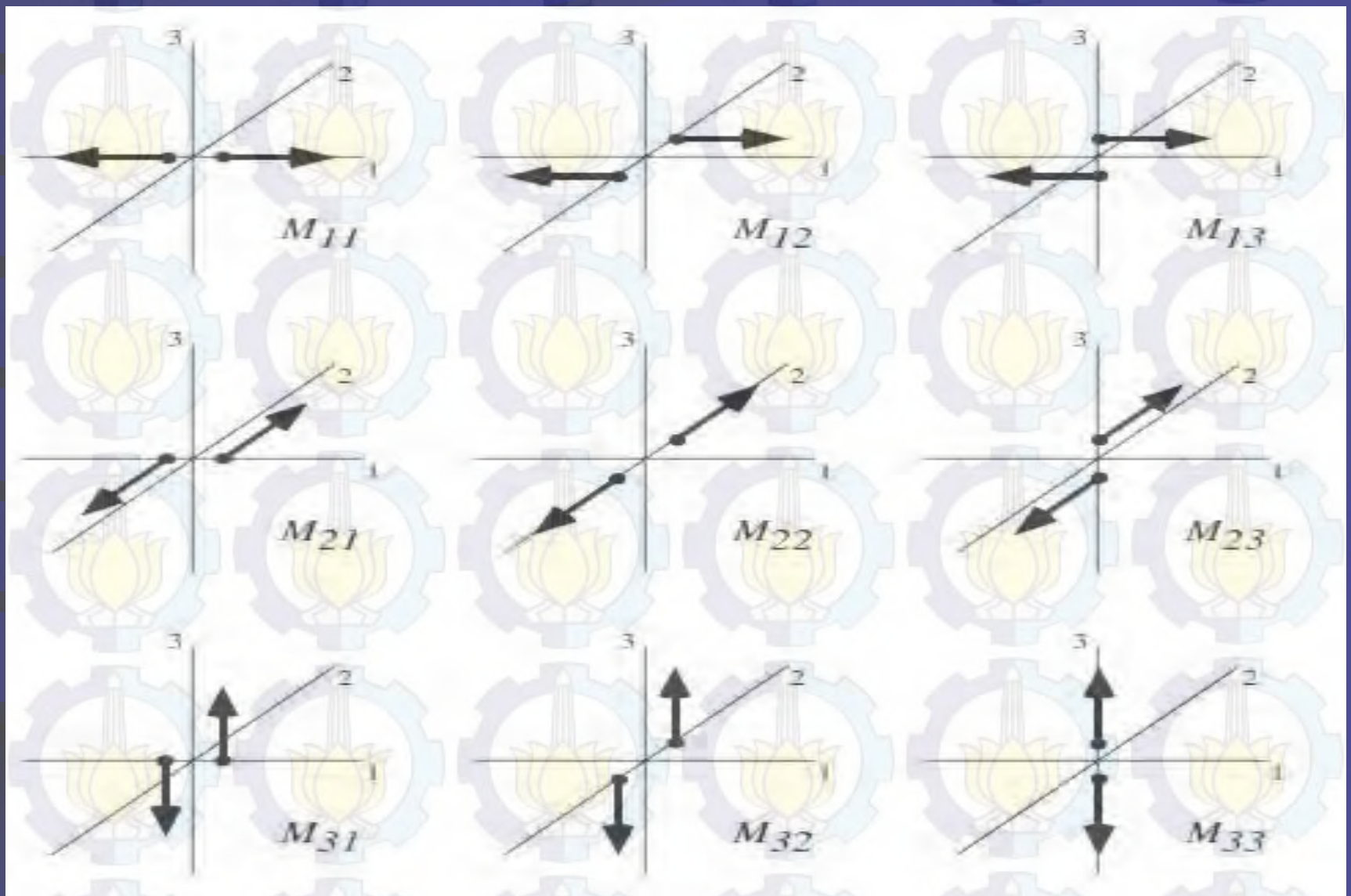
KAJIAN PUSTAKA

Momen Tensor

Momen tensor menggambarkan arah gaya penyebab gempa bumi (Setyowidodo dan Santosa, 2011).

$M =$

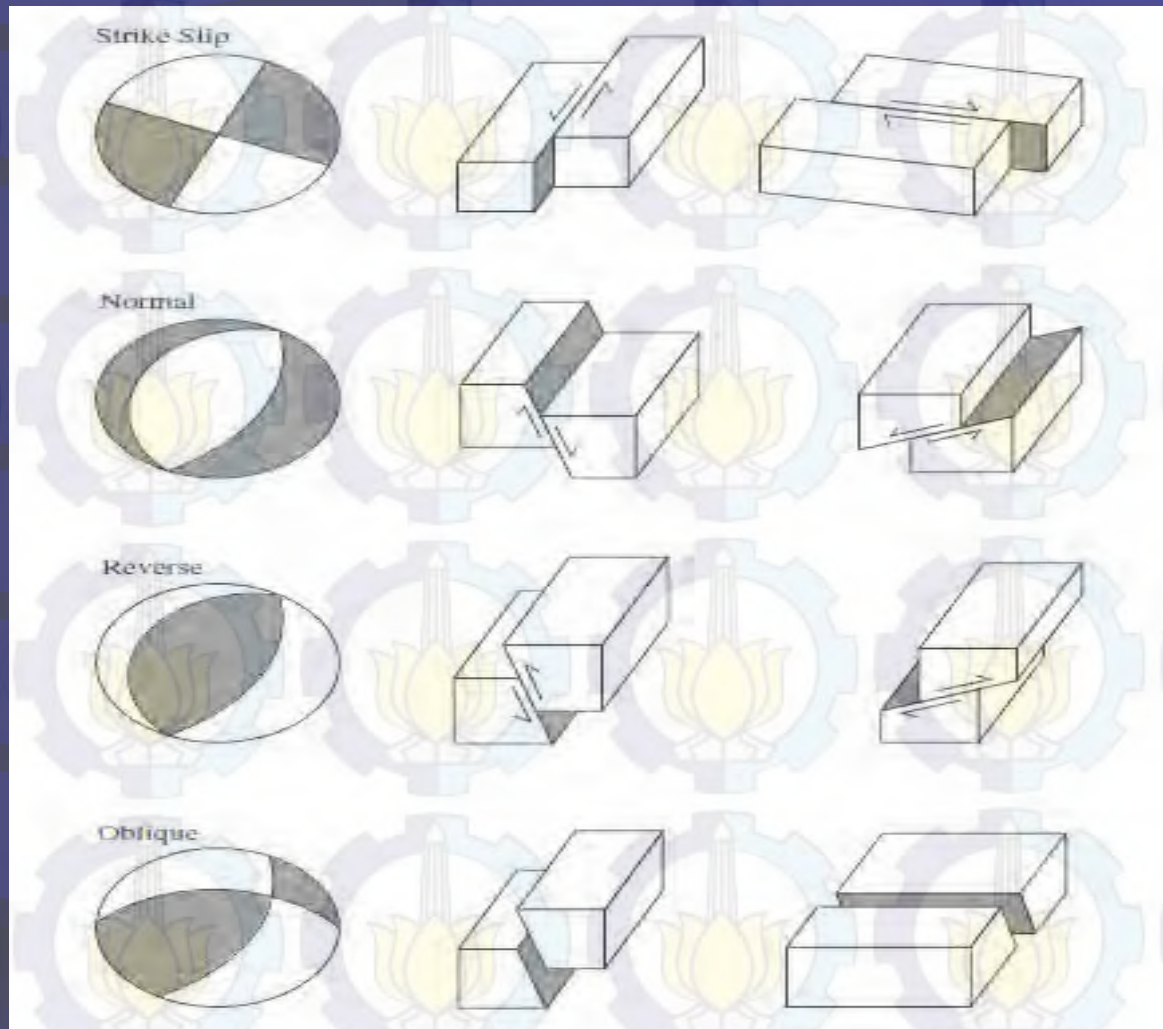
$$\begin{bmatrix} M_{xx} & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & M_{yy} & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & M_{zz} \end{bmatrix}$$



Pasangan Gaya dari Komponen Momen Tensor
(Shearer, 2009)

Mekanisme Fokus

Mekanisme fokus gempa atau *focal mechanism* digunakan untuk menerangkan sifat penjalaran energi gempa bumi yang berpusat pada hiposenter atau fokus gempa.



Hubungan *Focal Spheres* dan *Fault Geometries*
(Shearer, 2009)

Inversi Waveform Tiga Komponen

- Inversi yang melibatkan komponen vertikal, utara-selatan, dan barat-timur.
- Metode inversi merupakan metode geofisika digunakan untuk memprediksi kenampakan dibawah permukaan bumi.

- Data sebagai fungsi linier :

$$d = G \cdot m$$

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1m} \\ G_{21} & G_{22} & \dots & G_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{N1} & G_{N2} & \dots & G_{Nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_m \end{bmatrix}$$

- Solusi inversi linier :

$$m = [G^T G]^{-1} G^T d$$

METODOLOGI PENELITIAN

1. Reformating

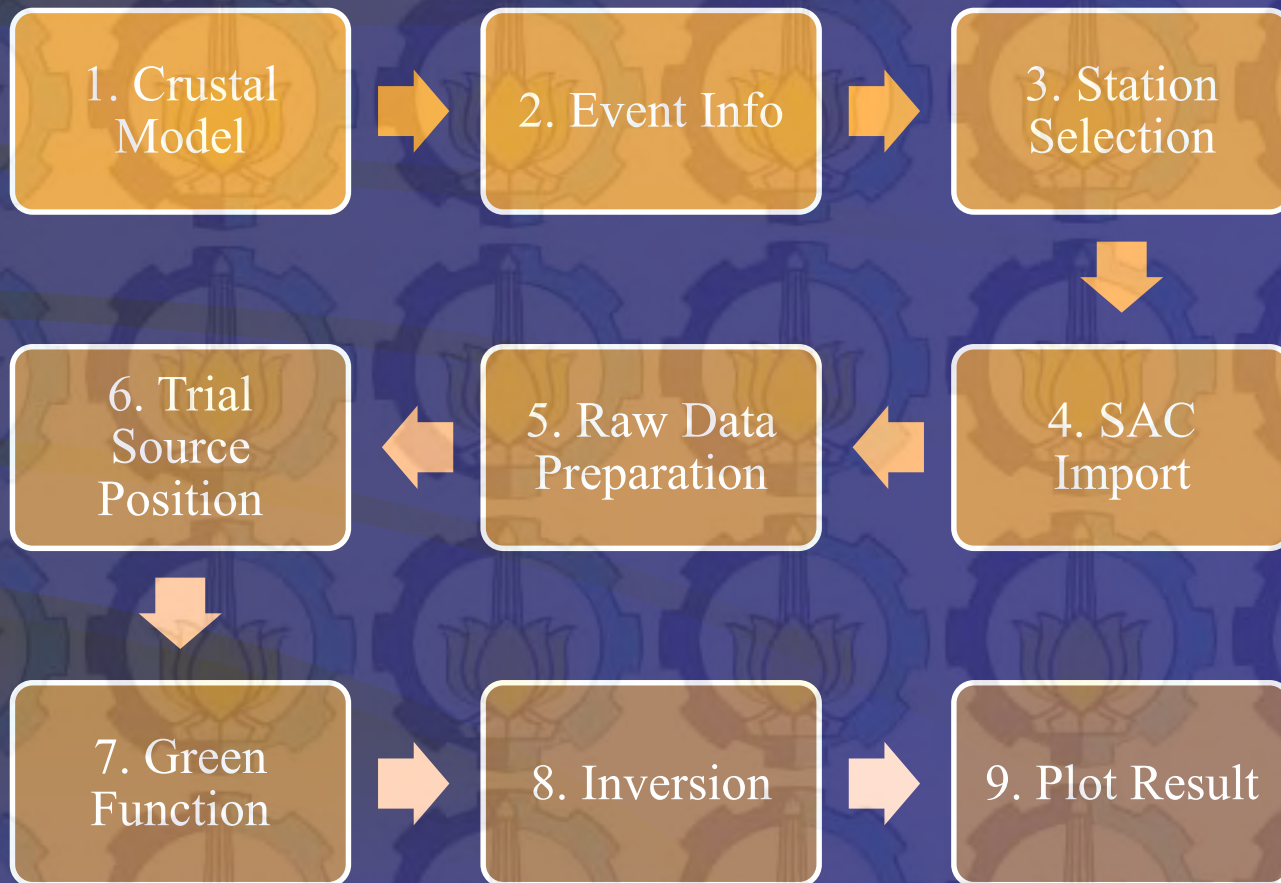


2. Pre - Processing



3. Pengolahan Data dengan ISOLA

PENGOLAHAN DATA dengan ISOLA



HASIL dan ANALISA PENELITIAN

■ Momen Tensor

Event	$M_{rr} = M_{33}$	$M_{tt} = M_{11}$	$M_{pp} = M_{22}$	$M_{rt} = M_{31}$	$M_{rp} = M_{32}$	$M_{tp} = M_{12}$	Exp
20140223	5.356	-4.441	-0.915	-1.183	0.400	2.072	16
20140322	-0.301	1.095	-0.795	0.524	2.519	0.735	16
20140504	2.809	1.097	-3.906	-0.981	-1.232	-0.636	16
20140529	1.408	-2.606	1.198	0.570	-1.582	-0.253	16
20140910	-0.321	-1.112	1.433	0.596	-0.835	-0.467	18
20140910	1.391	-2.449	1.058	0.168	-2.524	0.458	17
20140926	-0.580	1.037	-0.458	-1.017	1.369	0.930	16
20141115	-2.845	-1.732	4.576	-5.103	3.476	-4.689	18
20141115	-0.804	2.445	-1.641	0.584	1.331	3.279	17
20141118	0.949	0.122	-1.072	1.099	-0.718	-0.185	17

■ Bidang Sesar dan Auxiliary Plane

Event	Plane I			Plane II		
	Strike	Dip	Rake	Strike	Dip	Rake
20140223	116	39	92	293	52	88
20140322	200	88	-115	106	25	-5
20140504	205	59	113	346	38	57
20140529	121	65	138	232	52	32
20140910	309	87	-142	217	53	-4
20140910	136	68	135	246	49	30
20140926	108	74	-45	213	47	-158
20141115	120	78	-125	13	37	-21
20141115	197	86	-158	106	68	-4
20141118	149	72	62	29	33	145

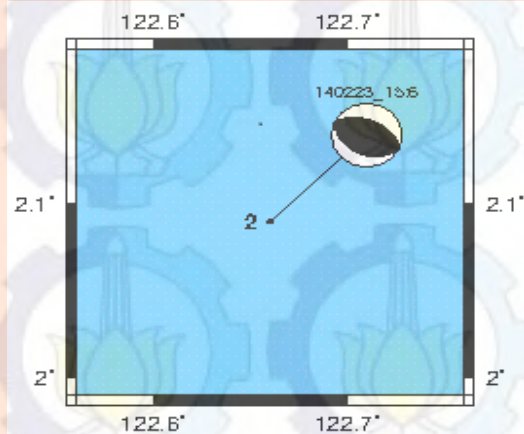
■ Panjang, Lebar, Luas, dan Slip Bidang Sesar

No	Origin Time	Mw (SR)	Depth (km)	L (km)	W (km)	A (km)	D (cm)
1	14_15:06:52	5,3	18,0	5,309	10,304	54,702	3,20
2	14_20:46:53	5,0	68,0	3,631	8,318	30,199	1,39
3	14_08:53:58	5,0	93,0	3,631	8,318	30,199	1,86
4	14_01:16:50	5,1	38,0	4,121	8,933	36,813	1,17
5	14_02:46:10	6,2	54,0	16,596	19,588	325,087	7,83
6	14_05:16:57	5,8	76,0	10,000	14,723	147,231	3,29
7	14_18:29:12	5,0	56,0	3,631	8,318	30,199	1,05
8	14_02:31:43	7,0	53,0	45,709	34,674	1584,893	8,14
9	14_03:08:05	6,3	104,0	18,836	21,038	396,278	1,53
10	14_04:47:21	5,6	59,0	7,762	12,764	99,083	7,59

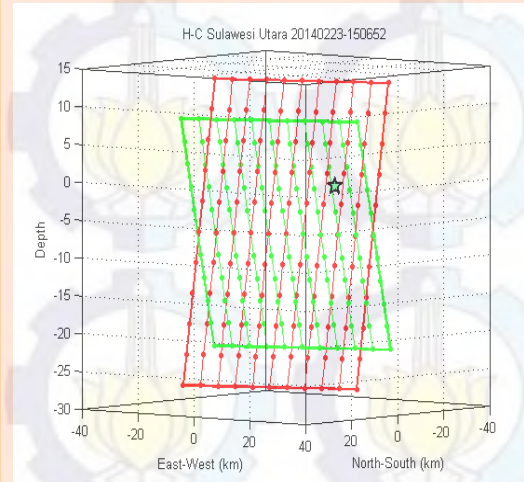
■ Hubungan Beachball, Fault Plane, dan Fault Types

Beachball

20140223 150652



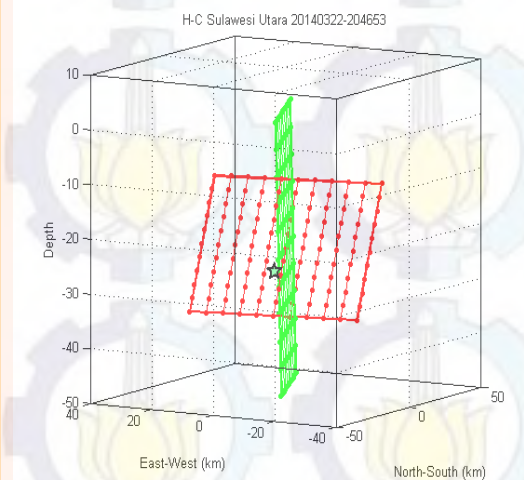
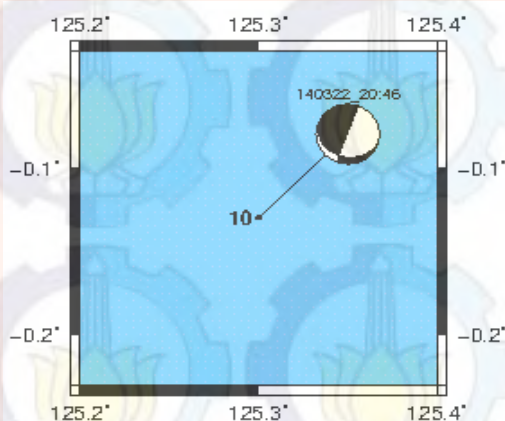
Fault Plane



Fault Types

dip-slip Reverse

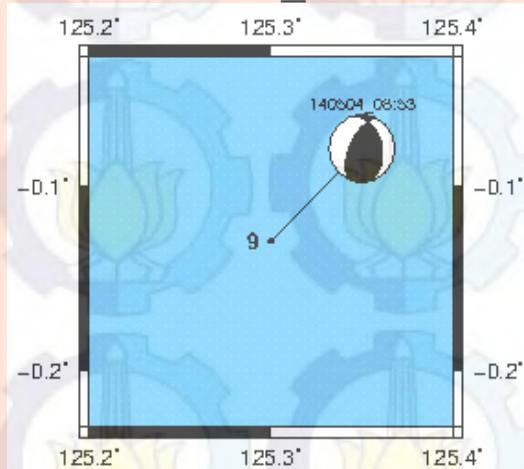
20140322_204653



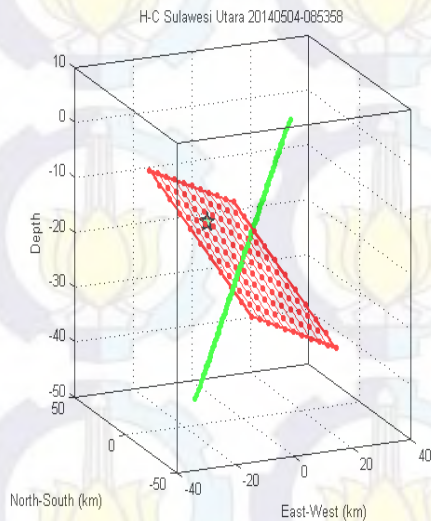
Oblique, didominasi
dip-slip Reverse

Beachball

20140504_085358



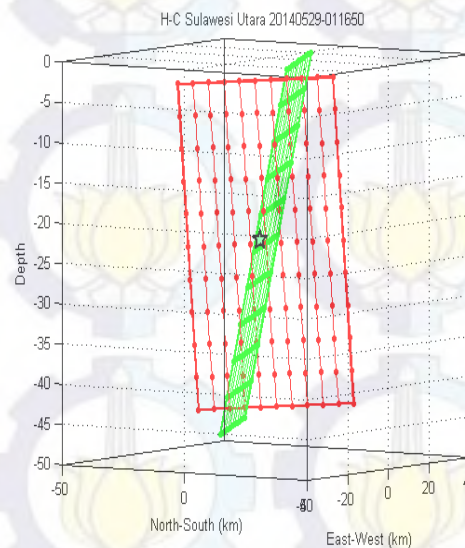
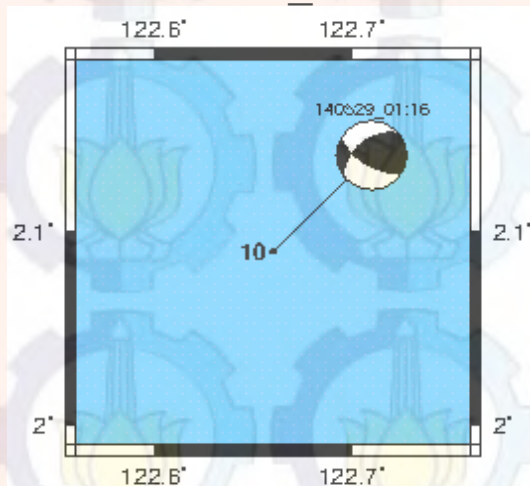
Fault Plane



Fault Types

Oblique, dominan
dip-slip Reverse

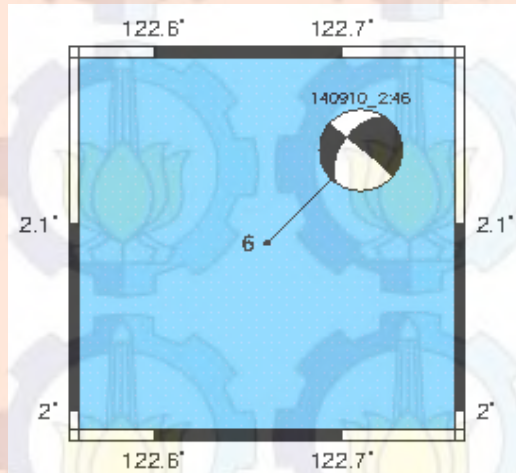
20140529_011650



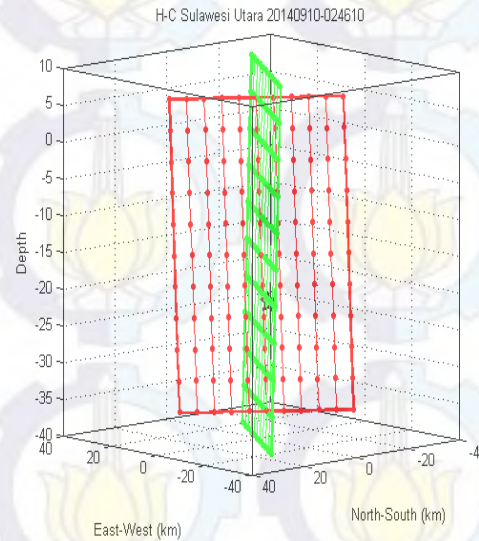
Oblique, dominan
dip-slip Reverse

Beachball

20140910_024610



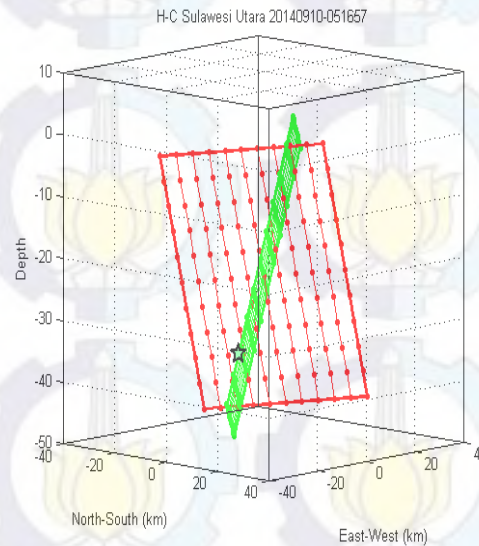
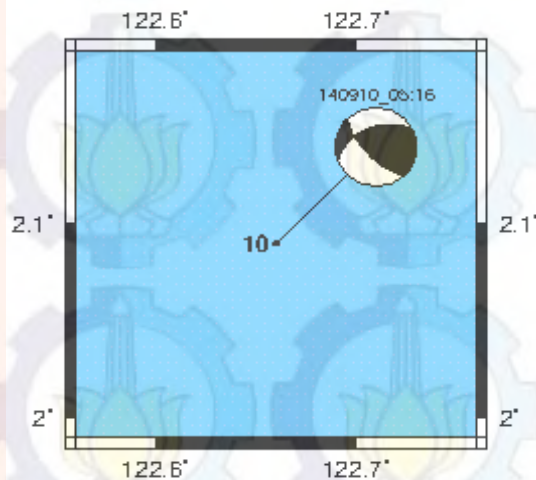
Fault Plane



Fault Types

Oblique, dominan
dip-slip Reverse

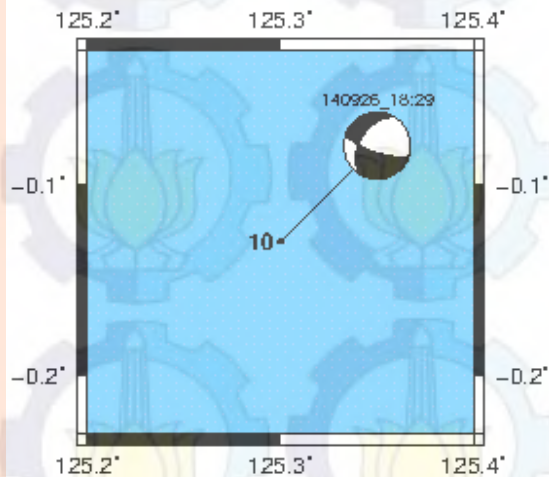
20140910_051657



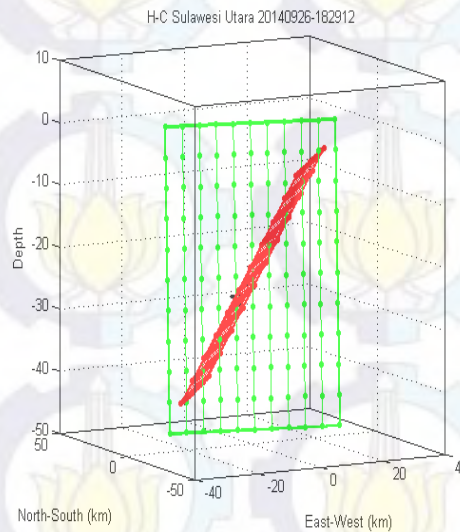
Oblique, dominan
dip-slip Reverse

Beachball

20140926_182912



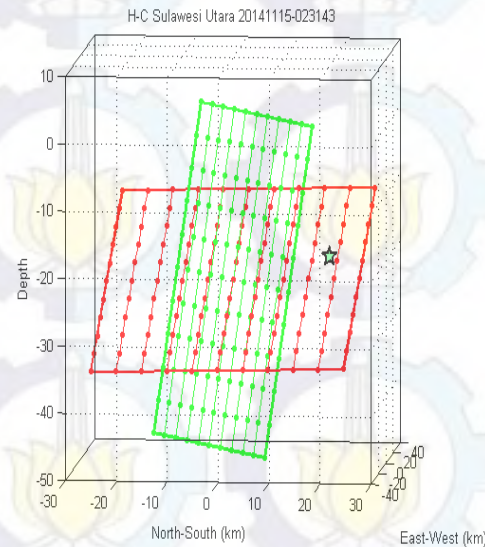
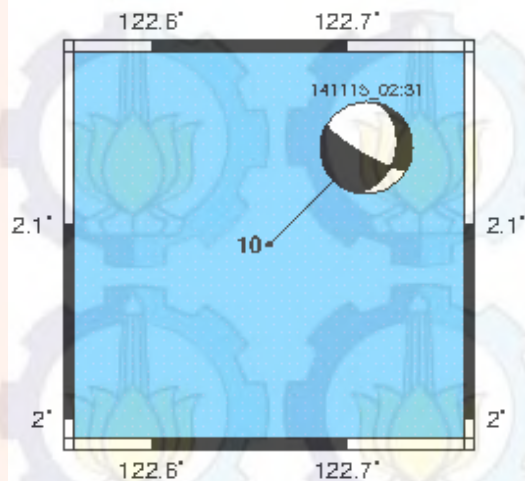
Fault Plane



Fault Types

Oblique, dominan
dip-slip Reverse

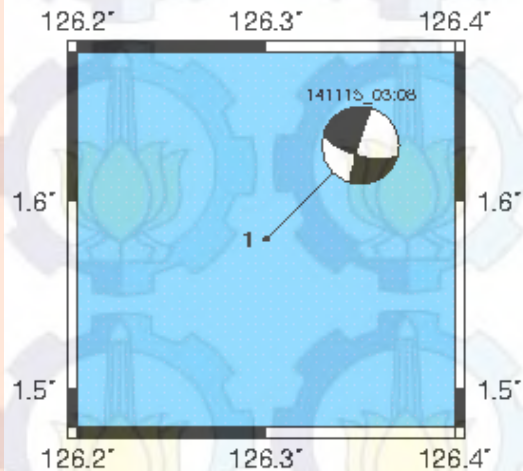
20141115_023143



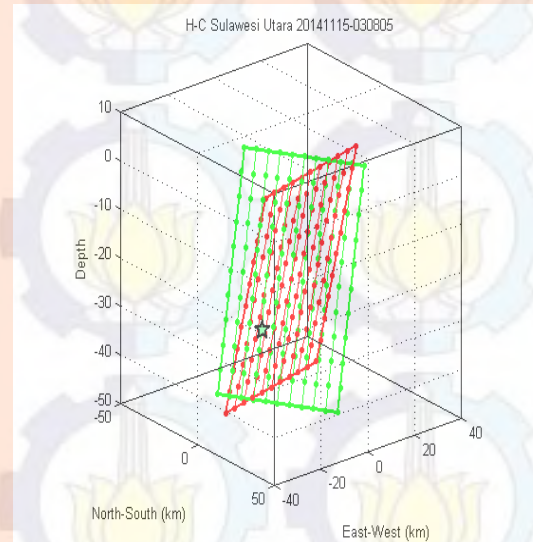
Oblique, dominan
dip-slip Reverse

Beachball

20141115_030805



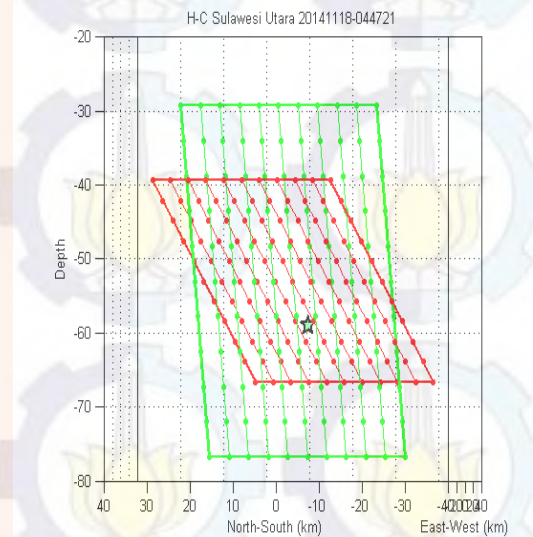
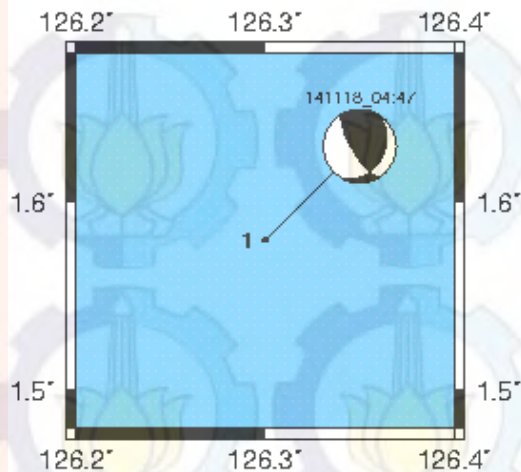
Fault Plane



Fault Types

Oblique, dominan
dip-slip Reverse

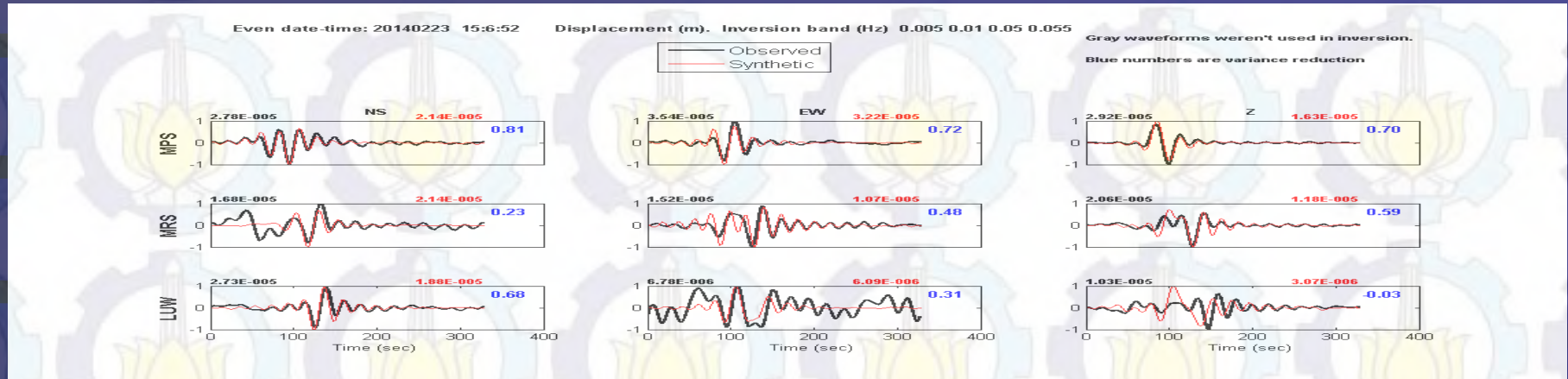
20141118_044721



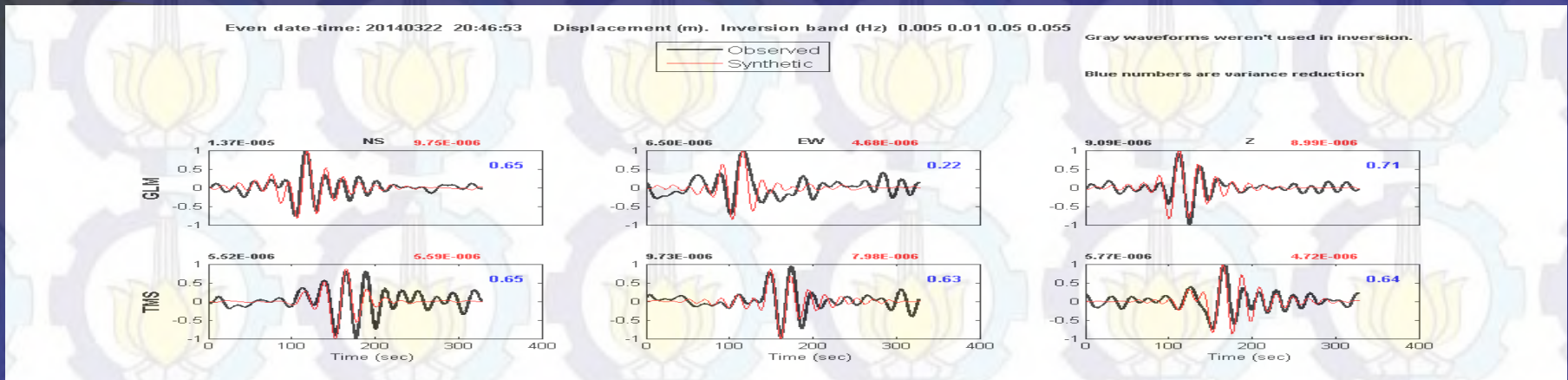
Oblique, dominan
dip-slip Reverse

■ Fitting Inversi Waveform Data Sintetik (Merah) dan Data Obsevasi (Hitam)

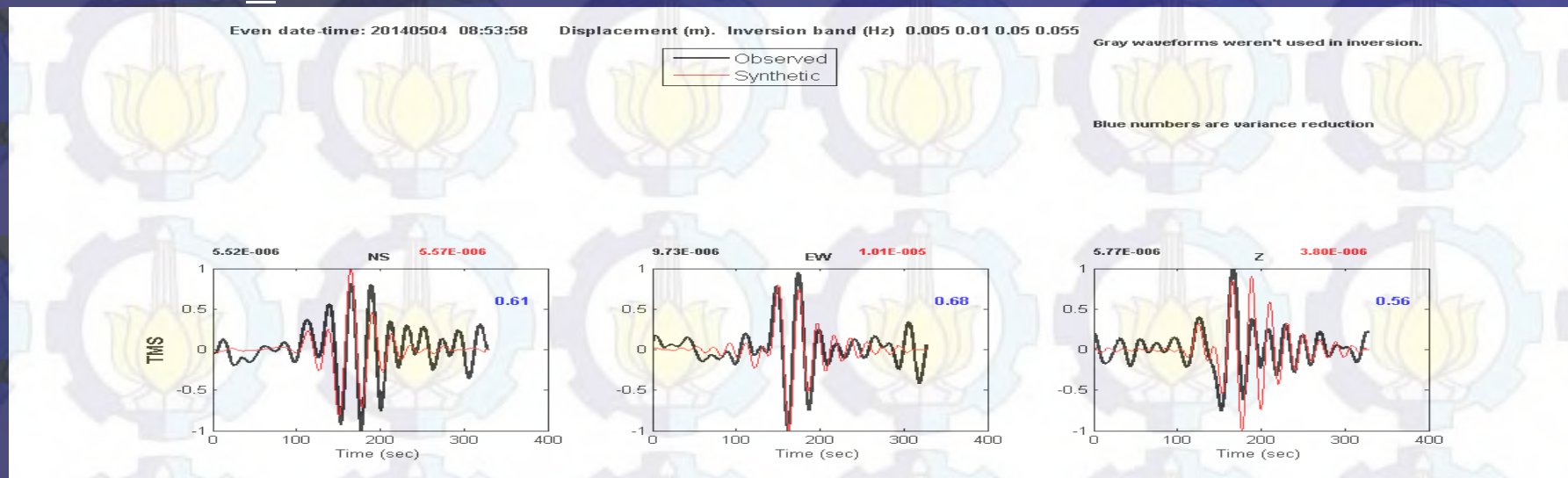
1. 20140223_150652



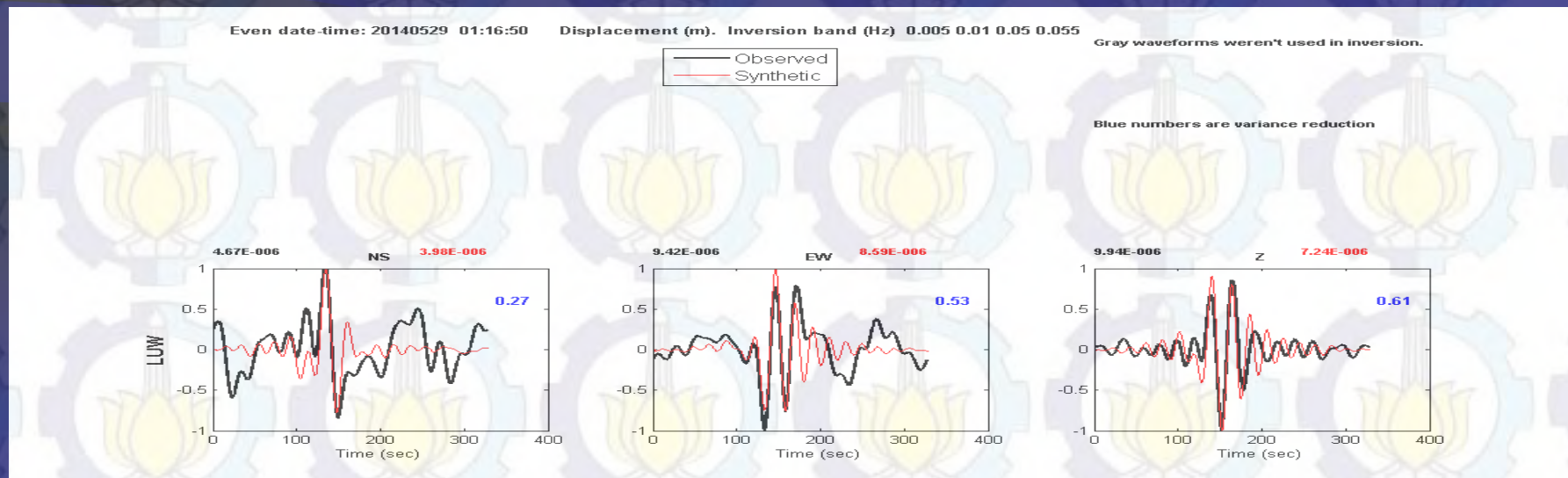
2. 20140322_204653



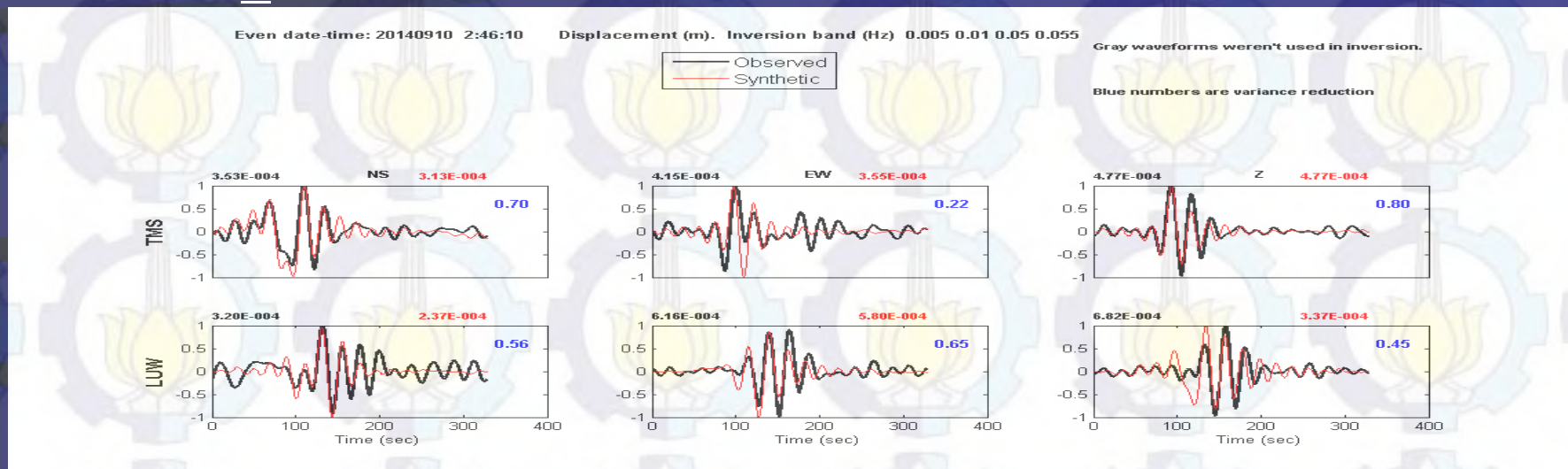
3. 20140504_085358



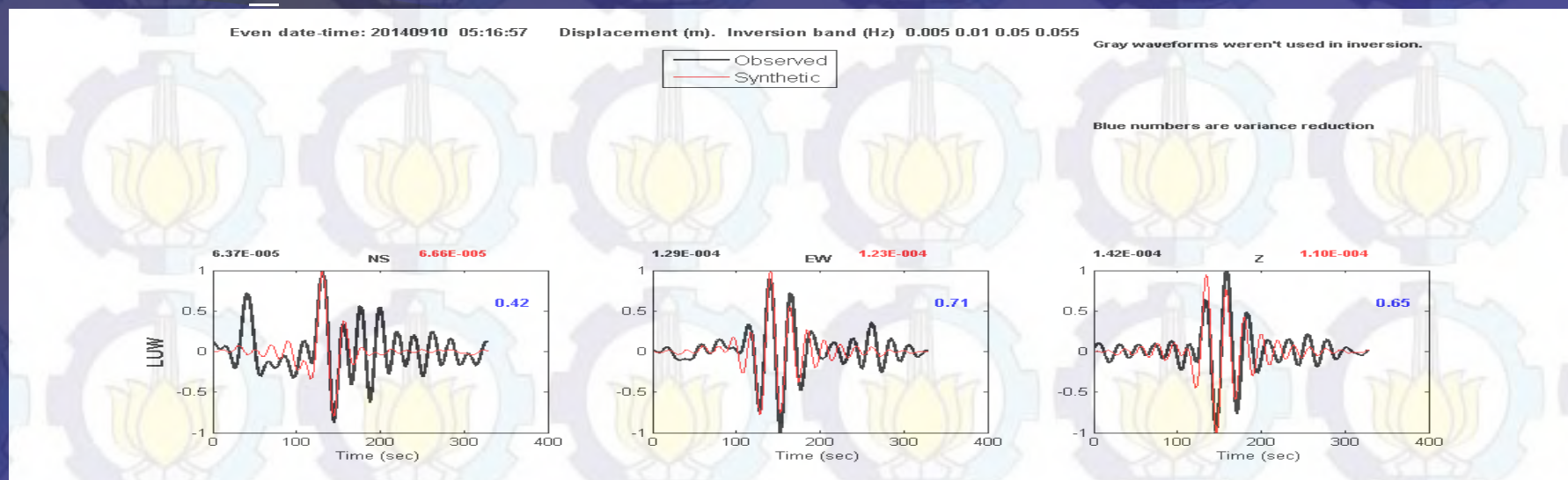
4. 20140529_011650



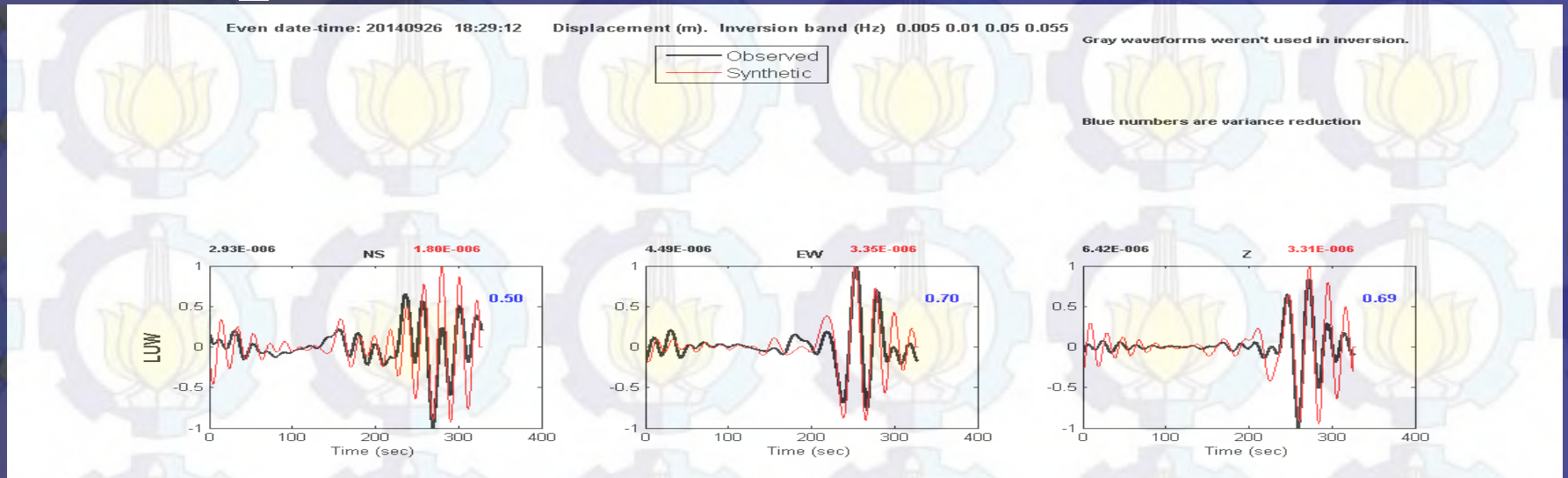
5. 20140910_024610



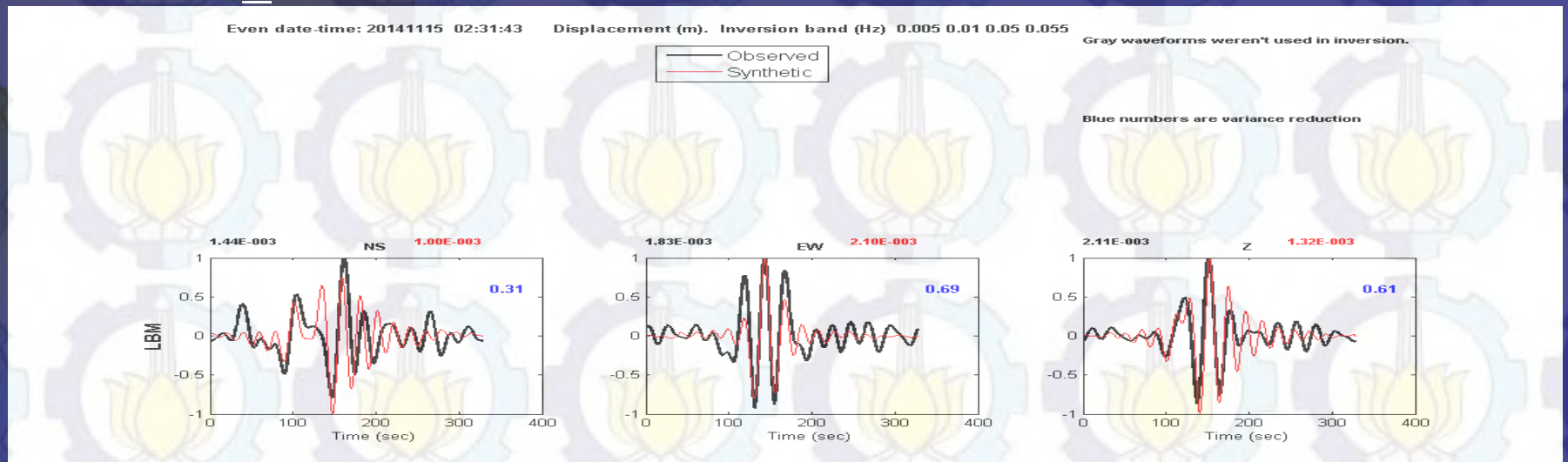
6. 20140910_051657



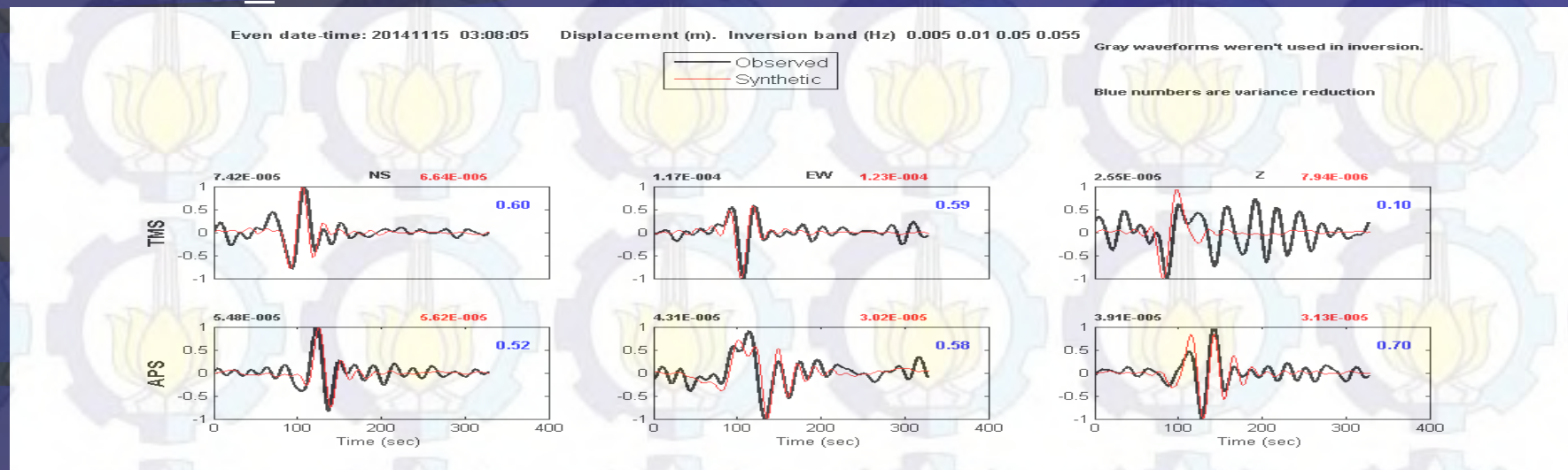
7. 20140926_182912



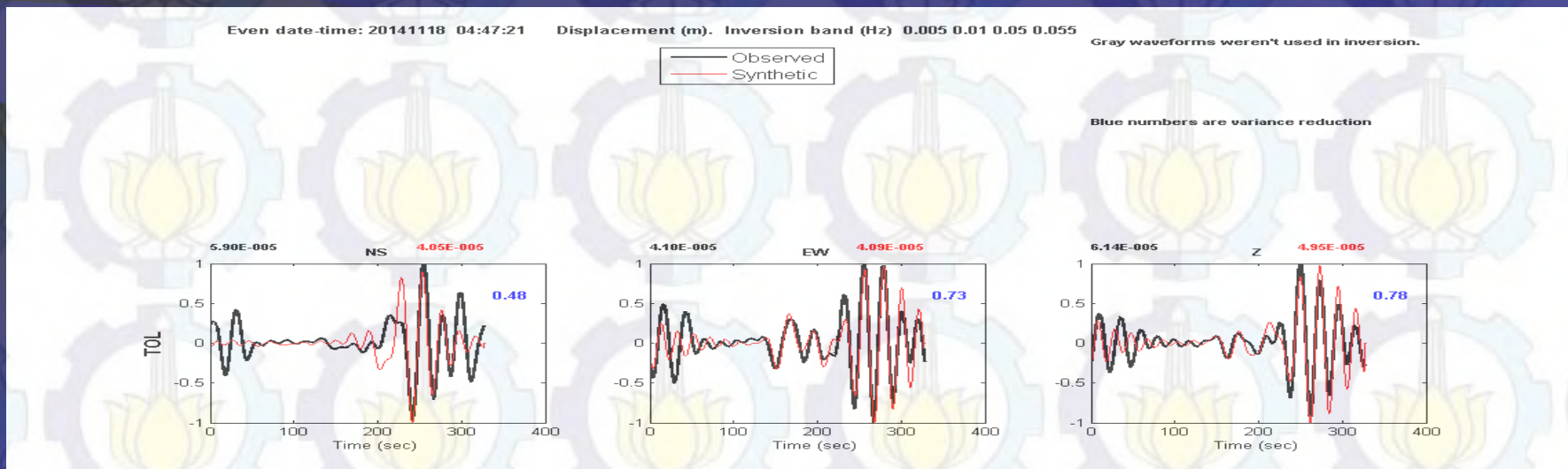
8. 20141115_023143



9. 20141115_030805



10. 20141118_044721



■ Perbandingan Hasil Perhitungan Momen Skalar

No	Momen Skalar (N m)		Δ
	ISOLA	Global GMT	
1	$5,520 \times 10^{16}$	$1,560 \times 10^{24}$	$1,559 \times 10^{24}$
2	$2,850 \times 10^{16}$	$1,040 \times 10^{24}$	$1,039 \times 10^{24}$
3	$3,881 \times 10^{16}$	$7,150 \times 10^{23}$	$7,149 \times 10^{23}$
4	$2,827 \times 10^{16}$	$7,510 \times 10^{23}$	$7,509 \times 10^{23}$
5	$1,723 \times 10^{18}$	$3,230 \times 10^{25}$	$3,229 \times 10^{25}$
6	$3,337 \times 10^{17}$	$8,630 \times 10^{24}$	$8,629 \times 10^{24}$
7	$2,141 \times 10^{16}$	$5,350 \times 10^{23}$	$5,349 \times 10^{23}$
8	$8,725 \times 10^{18}$	$4,750 \times 10^{26}$	$4,749 \times 10^{26}$
9	$4,186 \times 10^{17}$	$9,680 \times 10^{24}$	$9,679 \times 10^{24}$
10	$5,092 \times 10^{17}$	$5,660 \times 10^{24}$	$5,659 \times 10^{24}$

■ Perbandingan Fault Types Bidang Sesar

No	Event	Fault Types	
		ISOLA	Global GMT
1	20140223_150652	Reverse	Reverse
2	20140322_204653	Reverse	Reverse
3	20140504_085358	Reverse	Reverse
4	20140529_011650	Reverse	Reverse
5	20140910_024610	Reverse	Reverse
6	20140910_051657	Reverse	Reverse
7	20140926_182912	Reverse	Reverse
8	20141115_023143	Reverse	Reverse
9	20141115_030805	Reverse	Reverse
10	20141118_044721	Reverse	Reverse

KESIMPULAN

- Besar **Momen Tensor** untuk masing-masing komponen dari gempa bumi **Sulawesi Utara** 2014 mempunyai rentang sebagai berikut :

$$M_{rr} = -0.580 \text{ exp16 sampai } -0.321 \text{ exp18}$$

$$M_{tt} = -4.441 \text{ exp16 sampai } -1.112 \text{ exp18}$$

$$M_{pp} = -3.906 \text{ exp16 sampai } 1.433 \text{ exp18}$$

$$M_{rt} = -1.183 \text{ exp16 sampai } 4.576 \text{ exp18}$$

$$M_{rp} = -1.582 \text{ exp16 sampai } 3.476 \text{ exp18}$$

$$M_{tp} = -0.636 \text{ exp16 sampai } -0.467 \text{ exp18}$$

-
- Pola bidang sesar gempa yang terjadi adalah dominasi sesar naik (**dip-slip Reverse**) dan sesar mendatar (**strike-slip**).
 - Besar **slip** maximum dari **event** gempa bumi Sulawesi Utara adalah 8,14 cm.



Sekian
&
Terimakasih